

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Dr. Fernando Betancourt
Ingeniero Supervisor
Sr. Rodrigo Aravena

**BALANCE DE AGUA Y AJUSTE CON MULTIPLICADORES DE
LAGRANGE. CONCENTRADORA LAGUNA SECA, MINERA
ESCONDIDA.**

EMILIO JOSÉ VENEGAS VENEGAS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero 2018

AGRADECIMIENTOS

Llegando al final de este intrincado camino, me detengo y respiro por un efímero momento para observar desde otra perspectiva todos aquellos hitos que marcaron el desarrollo de la historia que a estas alturas culmina.

Viniéndome como recuerdos fotografías de momentos donde el apoyo constante de mis cercanos fue el impulsor para alcanzar las metas propuestas.

Comienzo por agradecer a mi abnegada madre Sandra, quien desde que yo era pequeño se sacrificó por mi bienestar, quien con esfuerzo y dedicación se levantaba de madrugada para acompañarme durante todos estos años, quien me dió la vida y todos los valores que me definen.

A mis primos Nayadhe y Ossiell, quienes son mis verdaderos hermanos, compañeros de aventuras de infancia y de los cuales me encuentro muy orgulloso por sus logros personales.

A mi abuela Cidiela, mi abuelo Hugo, mis tías Rosana, Doris e Isidora, mi tío Victor, gracias a todos por su apoyo incondicional, por la vida familiar, por la comprensión y la entrega, por su cariño no retribuido de mi parte.

Agradezco inmensamente a Sofía, el pilar y la luz en mi penumbra, mi soporte en momentos amargos, agradezco tu paciente compañía y entrega incondicional, tú inocente dulzura, tu tesón para ser el último empujón que me permite derribar todos los obstáculos, gracias por ser la persona que me guió hasta terminar este trabajo y me permitió cerrar esta etapa. Gracias por permitirme ser también parte de tu familia durante este tiempo, a quienes les agradezco el ilimitado afecto recibido, el respeto y el que siempre estén ahí para tenderme una mano auxiliadora.

Agradezco a mis amigos de toda la vida, sólo queda excusarme por mi natural lejanía con ustedes y a mis amigos de la universidad Daniela, Fernanda, Sebastián, Fabián, Noelia, Teresa, Patricio, Felipe.

Al equipo de trabajo de Minera Escondida y colaboradores que me acompañaron durante mi experiencia en mi querida Antofagasta, quienes hicieron muy grata mi estadía en faena, principalmente a mi tutor Rodrigo del que personalmente estoy muy agradecido.

Agradezco a todos aquellos que aportaron sincera y altruistamente a mi crecimiento personal, cuyo aporte a mi vida es incuantificable, muchas gracias.

Termino de escribir con un nudo en la garganta, reflexionando sobre lo importante que han sido en mi vida sin saberlo, por todas esas alegrías y tristezas que hemos pasado juntos, por los momentos que habremos de vivir más adelante. Muchas gracias.

RESUMEN

Minera Escondida operada por BHP Billiton, se encuentra en el desierto de Atacama a 3.100 m.s.n.m., es la mina con mayor producción de cobre fino en el mundo, alcanzando por sobre el millón de toneladas métricas de cobre fino en 2017. Estas cifras implican un importante consumo de agua, recurso crítico para la operación de Escondida y principalmente para sus tres plantas concentradoras Los Colorados, Laguna Seca Línea 1 y Línea 2.

El objetivo de esta memoria de título es realizar el balance de agua para las plantas concentradoras Laguna Seca Línea 1 y Línea 2 pertenecientes a Minera Escondida y ajustarlo aplicando multiplicadores de Lagrange, para lo cual fue necesario ejecutar el levantamiento completo del estado de la instrumentación y de los datos sobre los flujos de agua de ambas plantas concentradoras, estimar el error de medición de flujos, actualizar las mallas nodales de balance, cálculo y reconciliación del balance de sólidos, cobre fino y agua.

Para el caso de la Línea 1, La comparación entre los resultados del balance de agua respecto a los valores reconciliados muestra una importante adición de agua no cuantificada en la etapa de flotación que alcanza un valor de 1.836.244 m³ de agua durante el mes del muestreo, lo que equivale a una diferencia del 17,44% en la adición de agua total y a una proporción de $0,43 \frac{m^3}{t}$, en cambio las colas *Rougher* reportaron una disminución en el volumen de agua por 1.295.216 m³ representando un ajuste del 15,22% sobre el totalizado mensual, mientras que las colas finales reportaron disminución y 1.107.745 m³, equivalente a un 9,58% sobre el valor total mensual.

La reconciliación de la Línea 2 evidencia una disminución en el agua cuantificada en la alimentación *Rougher* de 120.554 m³, lo que representa una diferencia del 0,89% y una razón de agua de $0,025 \frac{m^3}{t}$, mientras que para las colas finales se registra una disminución de 455.391 m³ durante el mes de estudio, equivalente a un ajuste del 3,38% sobre el total mensual.

La tasa de consumo ponderada de Laguna Seca Línea 1 es de $1,00 \frac{m^3}{t}$, valor que representa un sobreconsumo de 447,331 m³ sobre el valor reportado, en cambio para Laguna seca Línea 2, la tasa de consumo ponderada es $0,90 \frac{m^3}{t}$, significando un sobrecargo de 157,764 m³.

Se concluye que la mayor pérdida en la eficiencia en el consumo de agua para ambas líneas se debe a la inadecuado control en la adición de agua de procesos al sistema, agua que principalmente se reporta en las colas finales, mientras que las pérdidas de eficiencia en la recuperación de agua se deben a porcentajes de sólidos del orden de 49% y 50% en la descarga de los espesadores de relaves de la Línea 1 y Línea 2 respectivamente.

ABSTRACT

Minera Escondida operated by BHP Billiton, is located in the Atacama desert at 3,100 meters above sea level, it is the mine with the highest production of fine copper in the world, reaching over one million metric tons of fine copper in 2017. These figures imply an important water consumption, a critical resource for the Escondida operation and mainly for its three concentrator plants.

The purpose of this title report is to carry out the water balance for the Laguna Seca concentrator plants Línea 1 and Línea 2 belonging to Minera Escondida and to adjust it by applying Lagrange multipliers, for which it was necessary to execute the complete survey of the state of the instrumentation and of the data on the water flows of both concentrator plants, estimate the error of measurement of flows, update the nodal mesh of balance, calculation and reconciliation of the balance of solids, fine copper and water.

For the case of Línea 1, the comparison between the results of the water balance with respect to the reconciled values shows an important addition of unquantified water in the flotation stage that reaches a value of 1,836,244 m³ of water during the month of the sampling, which is equivalent to a difference of 17.44% in the addition of total water and a proportion of $0.43 \frac{m^3}{t}$, while the Rougher tails reported a decrease in the volume of water by 1,295,216 m³ representing an adjustment of 15.22% over the monthly total, while the final tailings reported a decrease and 1,107,745 m³, equivalent to 9.58% of the total monthly value.

The reconciliation of Línea 2 shows a decrease in water quantified in the Rougher feed of 120,554 m³, which represents a difference of 0.90% and a water ratio of $0.025 \frac{m^3}{t}$, while for the final tails there is a decrease of 455,391 m³ during the month of study, equivalent to an adjustment of 3.38% over the monthly total.

The weighted consumption rate of Laguna Seca Línea 1 is $1.00 \frac{m^3}{t}$, a value that represents an overconsumption of 447.331 m³ over the reported value, however for Laguna Seca Línea 2, the weighted consumption rate is $0,90 \frac{m^3}{t}$, meaning a surcharge of 157,764 m³.

It is concluded that the greatest loss in efficiency in water consumption for both lines is due to the inadequate control in the addition of water from processes to the system, water that is mainly reported in the final tails, while the efficiency losses in The recovery of water is due to percentages of solids in the order of 49% and 50% in the discharge of tailings thickeners from Línea 1 and Línea 2 respectively.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS	2
1.1.1.	OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	2
2.	ANTECEDENTES	2
2.1.	MINERA ESCONDIDA	2
2.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	3
2.2.1.	CONCENTRADORA LAGUNA SECA LÍNEA 1	3
2.2.2.	ALIMENTACIÓN DE MINERAL DESDE STOCKPILE	4
2.2.3.	MOLIENDA SAG LAGUNA SECA LÍNEA 1.....	4
2.2.4.	MOLIENDA DE BOLAS Y CLASIFICACIÓN EN CICLONES LÍNEA 1 L1	4
2.2.5.	CIRCUITO DE FLOTACION Y REMOLIENDA LÍNEA 1.....	4
2.2.6.	ESPEZAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 1... 5	
2.2.7.	CONCENTRADORA LAGUNA SECA LÍNEA 2	5
2.2.8.	MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 2.....	6
2.2.9.	CIRCUITO DE FLOTACIÓN Y REMOLIENDA LAGUNA SECA LÍNEA 2.....	6
2.2.10.	ESPEZAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE LÍNEA 2	6
2.3.	CONSUMO DE AGUA EN MINERIA	7
2.3.1.	CONSUMO DE AGUA CONTINENTAL	7
2.3.2.	CONSUMO DE AGUA DE MAR.....	7
2.3.3.	CONSUMO DE AGUA EN PROCESOS DE CONCENTRACIÓN.....	9
2.3.4.	CONSUMO SECUNDARIO DE AGUA	11
2.3.5.	AGUA FRESCA	11
2.3.6.	AGUA DE PROCESOS.....	11
2.4.	ESTADO DEL ARTE	11
2.5.	FUNDAMENTOS DEL BALANCE DE MASA	12
2.5.1.	BALANCE METALÚRGICO EN PLANTA CONCENTRADORA	12
2.5.2.	BALANCE DE MASA EN CIRCUITOS COMPLEJOS	13

2.6.	RECONCILIACIÓN DEL BALANCE DE MATERIA	14
2.6.1.	DETERMINACIÓN DEL ERROR DE MUESTREO.....	14
2.6.2.	ERROR ALEATORIO.....	14
2.6.3.	ERROR GRUESO.....	14
2.6.4.	PROPAGACIÓN DEL ERROR EN CALCULOS INDIRECTOS	15
2.6.5.	DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DE PESO.....	15
2.6.6.	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE.....	15
2.7.	ESTADO DE INSTRUMENTACIÓN EN LAGUNA SECA	16
2.7.1.	FLUJÓMETROS	16
2.7.2.	DATOS BALANCE ESPESAMIENTO DE RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 1..	18
2.7.3.	DATOS BALANCE ESPESAMIENTO DE RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 2..	19
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
3.1.	METODOLOGÍA	19
3.1.1.	RESOLUCIÓN DEL BALANCE	19
3.1.2.	MODELAMIENTO DE MALLAS DE BALANCE	20
3.1.3.	LEVANTAMIENTO DE DATOS.....	22
3.1.4.	BASE DE DATOS	23
3.1.5.	TRATAMIENTO DE DATOS Y ESTIMACIÓN DEL ERROR.....	23
3.1.6.	BALANCE DE MASA	24
3.1.7.	BALANCE DE MASA DE SÓLIDOS.....	24
3.1.8.	BALANCE DE MASA DE AGUA	24
3.1.9.	RECONCILIACIÓN DEL BALANCE	24
3.2.	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES.....	25
3.2.1.	BALANCE DE DISEÑO LAGUNA SECA LÍNEA 1.....	25
3.2.2.	BALANCE DE DISEÑO LAGUNA SECA LÍNEA 2.....	25
3.2.3.	BASE DE CÁLCULO TEMPORAL	28
3.2.4.	BASE DE CÁLCULO POR CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	28
3.2.5.	CIRCUITO DE MOLIENDA SAG	28
3.2.6.	MOLIENDA SECUNDARIA.....	28
3.2.7.	FLOTACIÓN	28

3.2.8.	ESPEADORES DE RELAVES Y CONCENTRADO	29
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	30
4.2.	BALANCE Y RECONCILIACIÓN DE SÓLIDOS	30
4.2.1.	BALANCE DE SÓLIDOS LAGUNA SECA LÍNEA 1	30
4.2.2.	BALANCE DE SÓLIDOS LAGUNA SECA LÍNEA 2	32
4.3.	BALANCE Y RECONCILIACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 1	34
4.4.	BALANCE Y RECONCILIACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 2	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
5.1	CONCLUSIONES	61
5.2.	RECOMENDACIONES	62
5.2.1.	RECOMENDACIONES OPERACIONALES	62
5.2.2.	RECOMENDACIONES TÉCNICAS	63
6.	BIBLOGRAFÍA	65
7.	ANEXOS	67
7.1.	LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA	67
7.1.1.	BALANCE EN ESTADO ESTACIONARIO	67
7.2.	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE	67
7.3.	ECUACIONES UTILIZADAS PARA ESTIMACIÓN DE FLUJOS	69
7.3.1.	CONSTANTES UTILIZADAS	70
7.4.	DIAGRAMAS LAGUNA SECA LÍNEA 1	70
7.4.1.	ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS SAG 4 LÍNEA 1	71
7.4.2.	ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA SAG 4 LÍNEA 1	71
7.4.3.	ECUACIONES BALANCE DE SÓLIDOS MOLIENDA BOLAS LÍNEA 1	73
7.4.4.	ECUACIONES BALANCE DE AGUA MOLIENDA BOLAS LÍNEA 1	73
7.4.5.	ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS FLOTACIÓN LÍNEA 1	74
7.4.6.	ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA FLOTACIÓN LÍNEA 1	74
7.4.7.	ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 1	76
7.4.8.	ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 1	76

7.4.9. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 1	77
7.4.10. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 1	77
7.5. DIAGRAMAS LAGUNA SECA LÍNEA 2	79
7.5.1. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS SAG 5 LÍNEA 2	79
7.5.2. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA SAG 5 LÍNEA 2.....	79
7.5.3. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS MOLIENDA BOLAS LÍNEA 2	82
7.5.4. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA MOLIENDA BOLAS LÍNEA 2	82
7.5.5. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS FLOTACIÓN LÍNEA 2	84
7.5.6. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA FLOTACIÓN LÍNEA 2.....	84
7.5.7. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 2	86
7.5.8. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 2	86
7.5.9. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 2.....	87
7.5.10. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 2	87
7.6. BALANCE LÍNEA 1	89
7.7. BALANCE LÍNEA 2	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Instrumentación disponible para medición de caudal Línea 1.....	17
Tabla 2: Flujómetros agua de lavado columnar Línea 1	17
Tabla 3: Instrumentación disponible para medición de caudal Línea 2.....	18
Tabla 4: Lista de verificación para cierre de balance de masa.....	20
Tabla 5: Parámetros de diseño y operación para Laguna Seca Línea 1.....	26
Tabla 6: Suministro de agua según parámetros de diseño y capacidad de tratamiento nominal para Laguna Seca Línea 1	26
Tabla 7: Parámetros de diseño y operación para Laguna Seca Línea 2.....	27
Tabla 8: Suministro de agua según parámetros de diseño y capacidad de tratamiento nominal para Laguna Seca Línea 2.	27
Tabla 9: Definición de variables para balance de masa en Laguna Seca Línea 1.	78
Tabla 10: Definición de variables para balance de masa en Laguna Seca Línea 2.	88



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa ubicación Minera Escondida, Región de Antofagasta. (Fuente: Minera Escondida)	3
Figura 2: Diagrama de Procesos Concentradora Laguna Seca, Línea 1.	3
Figura 3: Diagrama de Procesos Concentradora Laguna Seca, Línea 2.	6
Figura 4: Consumo de agua continental por región 2016—2028. (Fuente: Cochilco, 2017)	7
Figura 5: Consumo de agua de mar por región 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017).....	8
Figura 6: Consumo de agua de mar en minería según proceso 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017).....	9
Figura 7: Consumo de agua total por procesos de concentración y LIX-SX-EW 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017)	10
Figura 8: Consumo de agua para las concentradoras Laguna Seca L1 y Laguna Seca L2 entre julio y diciembre de 2017.....	10
Figura 9: Balance general de agua en línea.	12
Figura 10: Diagrama de flujos simplificado para circuito de molienda cerrado inverso.....	13
Figura 11: Representación nodal del diagrama de la Figura 5.....	13
Figura 12: Resumen gráfico del análisis estadístico de la data sin filtrar de descarga de agua clara del TK-008.....	19
Figura 13: Representación circuito interno de agua en diagrama de bloques de Laguna Seca Línea 1 y Línea 2.....	21
Figura 14: Ejemplo de diagrama circuito SAG 4, CLS L1.	22
Figura 15: Ejemplo de flujómetro para alimentación de agua de procesos a SAG 4, CLS L1. ...	22
Figura 16: Pantalla de trabajo PHD.	23
Figura 17: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Rougher, Laguna Seca Línea 1.....	31
Figura 18: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Global, Laguna Seca Línea 1.	31
Figura 19: Ajuste porcentual sobre recuperación en peso Rougher y Global para Laguna Seca Línea 1.	32
Figura 20: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Rougher, Laguna Seca Línea 2.....	33
Figura 21: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Global, Laguna Seca Línea 2.	33
Figura 22: Ajuste porcentual sobre recuperación en peso Rougher y Global para Laguna Seca Línea 2.	34
Figura 23: Comparación de resultados de balance de agua según agua medida por flujómetros respecto a la reconciliación de agua reportada en la flotación Rougher.	35
Figura 24: Comparación de porcentaje de sólido para corriente de agua en alimentación Rougher según balance por flujómetros, información de sondas de análisis químico y balance de agua reconciliado.	36
Figura 25: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en alimentación flotación Rougher Línea 1.....	37
Figura 26: Resultados de balance y reconciliación de agua para corriente de colas Rougher, Línea 1.....	38
Figura 27: Resultados de balance y reconciliación de porcentaje de sólidos para corriente de colas Rougher, Línea 1.	38
Figura 28: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en colas Rougher Línea 1. .	39

Figura 29: Resultados balance y reconciliación para corriente de colas Scavenger, Línea 1...	40
Figura 30: Resultados balance y reconciliación de porcentaje de sólidos para corriente colas Scavenger, Línea 1.	40
Figura 31: Resultados de balance y reconciliación para volumen de agua en corriente de colas finales, Línea 1.	41
Figura 32: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólidos para corriente de colas finales, Línea 1.	41
Figura 33: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en colas finales Línea 1.	42
Figura 34: Diferencia de volumen de agua entre corriente de relave final no reconciliada respecto a medición de flujómetros de alimentación a espesadores de Relave, Línea 1.	43
Figura 35: Resultados de balance y reconciliación sobre medición de agua hacia espesadores de relave, Línea 1.	44
Figura 36: Porcentaje de ajuste para agua hacia espesadores de relave Línea 1.	44
Figura 37: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-006.	45
Figura 38: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-007.	46
Figura 39: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-008.	47
Figura 40: Comparación de Tasas de consumo de agua de procesos para la Línea 1 según planilla de instrumentación de agua de suministro, reporte de consumo de agua de NPI y reconciliación de agua recuperada.	47
Figura 41: Diferencia en volumen de agua de procesos que significa la reconciliación de la tasa de consumo para Laguna Seca Línea 1 según resultados del reporte NPI y planilla de cálculo según instrumentación.	49
Figura 42: Comparación de resultados de balance de agua según agua medida por flujómetros respecto a la reconciliación de agua reportada en la flotación Rougher Línea 2.	50
Figura 43: Resultado de balance y reconciliación en corriente de agua alimentación a flotación Rougher, Línea 2.	51
Figura 44: Porcentaje de ajuste sobre volumen de agua y porcentaje de sólidos en corriente de alimentación Rougher Línea 2.	52
Figura 45: Resultado de balance y reconciliación sobre corriente de agua en las colas Rougher Línea 2.	52
Figura 46: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólidos para colas Rougher Línea 2.	53
Figura 47: Porcentaje de ajuste sobre volumen de agua y porcentaje de sólidos en colas Rougher Línea 2.	54
Figura 48: Resultado de ajuste y reconciliación para volumen de agua en colas finales Línea 2.	55
Figura 49: Resultado de ajuste y reconciliación para porcentaje de sólidos en colas finales Línea 2.	55
Figura 50: Ajuste porcentual sobre volumen de agua y porcentaje de sólido en corriente de colas finales Línea 2.	56
Figura 51: Comparación Resultado de balance y reconciliación para volumen de agua en alimentación a espesadores de relave con valor para agua en alimentación Rougher reconciliado Línea 2.	56
Figura 52: Ajuste porcentual sobre alimentación de espesadores de relave TK-014, TK-015 y TK-016, Línea 2.	57

Figura 53: Volumen de agua no reconciliado para alimentación a espesadores de relave TK-015, TK-016 y TK-018, Línea 2.	58
Figura 54: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-014.....	58
Figura 55: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-015.....	59
Figura 56: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-016.....	59
Figura 57: Comparación de Tasas de consumo de agua de procesos para la Línea 2 según planilla de instrumentación de agua de suministro, reporte de consumo de agua de NPI y reconciliación de agua recuperada.....	60
Figura 58: Diferencia en volumen de agua de procesos que significa la reconciliación de la tasa de consumo para Laguna Seca Línea 2 según resultados del reporte NPI y planilla de cálculo según instrumentación.	61
Figura 59: Diagrama de flujos sub sistema SAG 4, Línea 1.....	70
Figura 60: Diagrama Sub Sistema MB-001, CLS L1.....	71
Figura 61: Diagrama Sub Sistema MB-002, CLS L1.....	72
Figura 62: Diagrama Sub Sistema MB-003, CLS L1.....	72
Figura 63: Diagrama Sub Sistema MB-004, CLS L1.....	73
Figura 64: Diagrama Sub Sistema Flotación CLS L1.....	74
Figura 65: Diagrama Sub Sistema TK-006.....	75
Figura 66: Diagrama Sub Sistema TK-007.....	75
Figura 67: Diagrama Sub Sistema TK-008.....	76
Figura 68: Diagrama Sub Sistema Espesamiento Concentrado.....	77
Figura 69: Diagrama subsistema SAG 5, Línea 2.....	79
Figura 70: Diagrama subsistema MB-005, Línea 2.....	80
Figura 71: Diagrama subsistema MB-006, Línea 2.....	80
Figura 72: Diagrama subsistema MB-007, Línea 2.....	81
Figura 73: Diagrama subsistema MB-008, Línea 2.....	81
Figura 74: Diagrama subsistema flotación Línea 2.....	84
Figura 75: Diagrama Subsistema TK-014, Línea 2.....	85
Figura 76: Diagrama Subsistema TK-015, Línea 2.....	85
Figura 77: Diagrama Subsistema TK-016, Línea 2.....	86
Figura 78: Diagrama subsistema espesadores de concentrado, Línea 2.....	87
Figura 79: Matriz A1 multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.....	89
Figura 80: Matriz A1 ⁻¹ multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.....	89
Figura 81: Matriz A2 multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.....	90
Figura 82: Matriz A2 ⁻¹ multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.....	90
Figura 83: Matriz A3 multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos agua Línea 1.....	91
Figura 84: Matriz A3 ⁻¹ multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos agua Línea 1.....	91
Figura 85: Matriz A4 multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos agua Línea 1.....	92
Figura 86: Matriz A4 ⁻¹ multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos agua Línea 1.....	92
Figura 87: Ejemplo resultados compósitos Línea 1.....	93
Figura 88: Funciones en VBA para cálculo de densidad de pulpa.....	93
Figura 89: Interface de balance interactivo Línea 1, SAG 4-Molienda Bolas.....	94
Figura 90: Interface de balance interactivo Línea 1, Molienda Bolas-Flotación.....	95
Figura 91: Interface de balance interactivo Línea 1, Flotación-Espesamiento.....	96
Figura 92: Matriz A multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos L2.....	97
Figura 93: Matriz A ⁻¹ multiplicadores de Lagrange ajuste de Sólidos Línea 2.....	98

Figura 94: Matriz A multiplicadores de Lagrange para ajuste de agua Línea 2.....	99
Figura 95: Matriz A^{-1} multiplicadores de Lagrange para ajuste de agua Línea 2.	100
Figura 96: Ejemplo compósitos Línea 2.....	101
Figura 97: Funciones de cálculo de densidad en VBA.....	101
Figura 98: Función para cálculo de agua recuperada espesadores de relave.	105
Figura 99: Interface de balance interactivo Línea 2, SAG 5-Molienda Bolas.....	106
Figura 100: Interface de balance interactivo Línea 2, Molienda Bolas-Flotación.....	107
Figura 101: Interface de balance interactivo Línea 2, Flotación-Espesamiento.	108



NOMENCLATURA

CLC: Concentradora “Los Colorados”

CLS: Concentradora Laguna Seca.

Cochilco: Comisión Chilena del Cobre

C_p: Porcentaje de Sólidos en peso

EWS: Planta desalinizadora “Escondida Water Supply”.

Fi: Definición de variable para balance de corriente de agua, $\frac{m^3}{h}$

FY: Año fiscal (de la sigla en inglés “Fiscal Year”).

L1: Concentradora Laguna Seca Línea 1

L2: Concentradora Laguna Seca Línea 2 (OGP 1)

LCE: Sigla del proyecto “Los Colorados Extensión Project”.

LSD: Sigla del proyecto “Laguna Seca Debottlenecking Project”.

MEL: Minera Escondida Limitada

MTQ: Pozos de Monturaquí

NPI: Gerencia de Non Process & Infrastructure

OGP 1: Sigla del proyecto “Organic Growth Project 1”, actual Línea 2-CLS.

P₈₀: 80% pasante del producto de molienda.

SAG: Molienda semi autógena (semi autogenous grinding)

Si: Definición de variable para balance de corriente de sólidos, $\frac{t}{h}$

Tag: Identificador único o etiqueta asignado a un dispositivo.

TD: Turno día

TN: Turno Noche

W_i: Factor de peso para método de reconciliación de Lagrange

λ_i : Multiplicador de Lagrange

1. INTRODUCCIÓN

Las principales operaciones mineras en Chile se encuentran desde la región metropolitana al norte, en zonas de gran altura geográfica y en condiciones de aridez y estrés hídrico extremo, este es el caso de Minera Escondida, ubicada a 173 km al sureste de Antofagasta, en el desierto de Atacama a 3,100 m.s.n.m.

Según Cochilco, lo anteriormente descrito implica que el abastecimiento del recurso hídrico en minería enfrenta los siguientes desafíos estratégicos de largo plazo, los que son:

- 1) Asegurar el suficiente suministro de agua considerando satisfacer mayores requerimientos debido a aumentos en producción y tratamiento, siendo este el caso de Escondida con la ejecución de LCE, LSD y OGP1.
- 2) Disminuir el consumo de agua fresca aumentando la eficiencia de recuperación de agua debido al nuevo escenario social, ambiental y económico más demandante, las que para el caso de Escondida se reflejan en las nuevas políticas hídricas de BHP Billiton publicadas en “ Informe de sustentabilidad BHP Chile 2016: Minera Escondida-Pampa Norte”.
- 3) Combinar los vínculos entre el agua, energía y las emisiones, para que la optimización de una de estas variables no afecte negativamente a otra, integrando nuevas fuentes de agua a la matriz de suministro.

Debido a las condiciones antes mencionadas y a la constante ampliación de sus operaciones, el agua se posiciona como un recurso crítico para el funcionamiento en Escondida, sobre todo considerando el desafío de posicionarse como la mina de cobre con mayor producción en el mundo aportando con un 5% de la producción global.

En 2015, se vivió una importante restricción en la capacidad productiva de las plantas concentradora por escasez de agua, debido principalmente a la puesta en marcha de Laguna Seca Línea 2 la que fue inaugurada en 2015 sin que se asegurara la capacidad de suministro para su funcionamiento. Esta situación priorizó la construcción de EWS, una planta desalinizadora de $9.000 \frac{m^3}{h}$, la que comenzó su operación durante el 2016.

Además, Cochilco en su informe “Consumo de agua en la minería del cobre al 2016” destaca que la búsqueda de una mirada integral en el abastecimiento de agua, reducción de consumos unitarios y el modo en que la minería se relaciona con las comunidades abren el camino para que estos riesgos se transformen en una oportunidad para el desarrollo minero.

Por esta razón que los esfuerzos de las empresas mineras se deben aunar en búsqueda de oportunidades para la optimización y eficiencia en el consumo del recurso hídrico y el análisis del potencial de consumo en un sector económico en constante crecimiento como es la minería.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el balance de agua para las plantas concentradoras Laguna Seca Línea 1 (CLS L1) y Línea 2 (CLS L2) pertenecientes a Minera Escondida y ajustarlo aplicando multiplicadores de Lagrange.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Actualizar y construir malla nodal del balance de agua para CLS L1.
- Construir malla nodal del balance de agua para CLS L2.
- Realizar el levantamiento de data sobre instrumentación existente, estado de instalación, mantención y calibración.
- Reconciliar el balance de agua para las Líneas 1 y 2 de Laguna Seca usando multiplicadores de Lagrange.
- Comparar el consumo de agua según parámetros de diseño y consumo real de operación.
- Identificar puntos de pérdida de eficiencia en el uso del agua.
- Sugerir cambios técnicos y/u operacionales para las Líneas 1 y 2 de CLS.

2. ANTECEDENTES

2.1. MINERA ESCONDIDA

Minera Escondida se encuentra ubicada en el desierto de Atacama, a una altitud por sobre los 3.100 m.s.n.m. en la región de Antofagasta y a unos 170 km al sureste de la ciudad de Antofagasta. Es operada por BHP Billiton a través de Minera Escondida Limitada, propietarios del 57,5%, otros inversionistas son Rio Tinto 30,0%, Jeco Corporation 10,0% y Jeco 2 Ltd. 2,5%.

Actualmente, Escondida posee la licitación de dos rajos abiertos desde donde se extrae el mineral de cobre, Escondida y Escondida Norte, rajos que abastecen de mineral a las plantas concentradoras Los Colorados, Laguna Seca Línea 1 y Línea 2, plantas que producen concentrados de cobre de alta ley y a las operaciones de lixiviación de óxidos y sulfuros de baja ley que producen cátodos de alta pureza.



Figura 1: Mapa ubicación Minera Escondida, Región de Antofagasta. (Fuente: Minera Escondida)

Según lo informado por BHP, la producción en 2017 alcanzó 1.000.017 toneladas de cobre fino en forma de cátodos y concentrado, resultados operacionales que posicionaron a Minera Escondida como la mina con mayor producción de cobre fino del mundo.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

2.2.1. CONCENTRADORA LAGUNA SECA LÍNEA 1

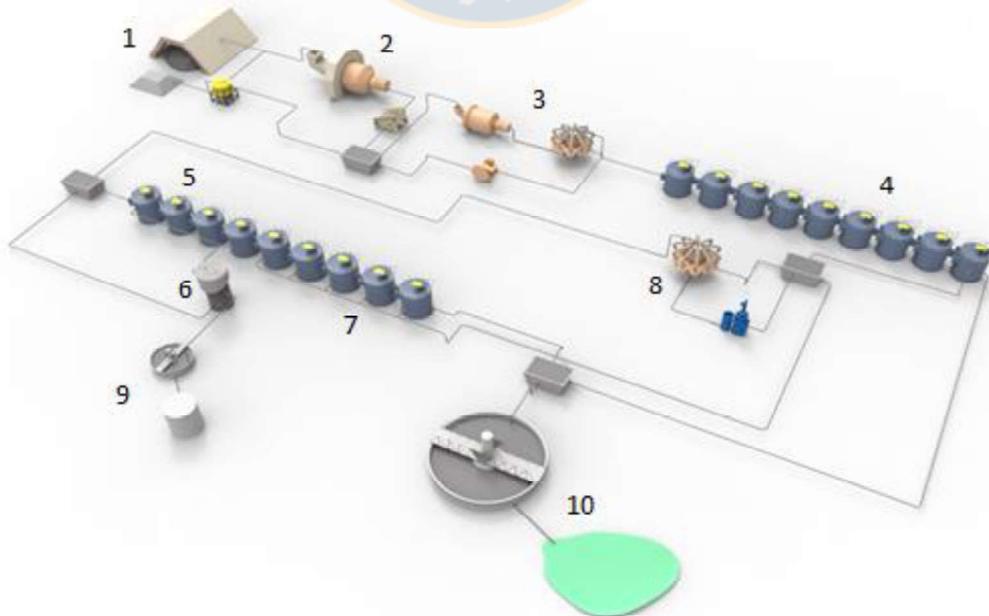


Figura 2: Diagrama de Procesos Concentradora Laguna Seca, Línea 1.

El diagrama de procesos de la línea 1 de Laguna Seca (Figura 2) cuenta con:

- 1) Alimentación de mineral desde *Stockpile*.
- 2) Molienda SAG y Clasificación en Harnero vibratorio.
- 3) Molienda en Molinos de Bolas y clasificación en baterías de ciclones en circuito cerrado inverso.
- 4) Flotación *Rougher*.
- 5) Flotación Primera limpieza en celda convencional.
- 6) Flotación Segunda limpieza en celda columnar.
- 7) Flotación *Scavenger*.
- 8) Remolienda en molino vertical y clasificación en batería de ciclones.
- 9) Espesamiento de concentrados.
- 10) Espesamiento de relaves.

2.2.2. ALIMENTACIÓN DE MINERAL DESDE STOCKPILE

La línea 1 cuenta con un *stockpile* encapsulado, donde 8 correas alimentadoras (*feeders*) abastecen a la correa principal de alimentación al SAG N°4 donde descarga en el chute de alimentación.

2.2.3. MOLIENDA SAG LAGUNA SECA LÍNEA 1

El mineral chancado proveniente del *stockpile* es conminuido en el SAG N°4 donde también se agrega la lechada de cal y el colector primario, el mineral molido es descargado al *trommel* a través de parrillas, el *oversize* del *trommel* se descarga al harnero vibratorio donde los *pebbles* se van a chancado y el *undersize* se va al sumidero donde la pulpa es diluida con agua para clasificación en las baterías de ciclones.

2.2.4. MOLIENDA DE BOLAS Y CLASIFICACIÓN EN CICLONES LÍNEA 1 L1

La pulpa en el sumidero es impulsada mediante bombas hacia las baterías de ciclones, la configuración de la molienda-clasificación es en circuito cerrado inverso, donde el *underflow* del ciclón pasa a reducción de tamaño en molino de bolas y la descarga del molino de bolas se devuelve al sumidero donde pasa nuevamente a clasificación en la batería de ciclones, el *overflow* del ciclón a su vez provee de pulpa a la flotación *Rougher* siendo el P_{80} objetivo para ambas plantas concentradoras 145 μm .

2.2.5. CIRCUITO DE FLOTACION Y REMOLIENDA LÍNEA 1

La separación selectiva de los minerales sulfurados de cobre se lleva a cabo en el circuito de flotación, que consta de una etapa de flotación primaria en celdas auto aspirantes WEMCO.

El Concentrado *Rougher* pasa a remolienda en molino vertical y clasificación en ciclones en circuito cerrado inverso, para posteriormente proporcionar de pulpa con mineral mayormente liberado a la etapa de limpieza primaria en celdas mecánicas convencionales. Las colas de la

limpieza primaria alimentan la flotación *Scavenger*, lugar en donde se agrega xantato como reactivo en avance, el concentrado *Scavenger* vuelve a remolienda-clasificación, mientras que el concentrado de la limpieza primaria suministra a la flotación de limpieza secundaria en columnas, las colas de las columnas vuelven a la limpieza primaria, mientras que el concentrado final sigue a la etapa de espesamiento.

Las colas *Rougher* y *Scavenger* van a espesamiento y posteriormente al tranque de relaves Laguna Seca.

2.2.6. ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 1

El concentrado final es espesado en los TK-021 y TK-022 con los objetivos de recuperar agua de procesos y que la descarga alcance un 65% de sólidos, el concentrado es llevado a la planta de filtro vía mineroducto hasta las instalaciones de Puerto Coloso, En donde reciben el tratamiento de filtrado, es acá donde el concentrado con hasta 9% de humedad es embarcado como producto final de la cadena de valor.

Mientras que el relave, que representa aproximadamente el 97% del sólido en la alimentación es espesado en los TK-006, TK-007 y TK-008, el agua clara retorna al proceso mediante las piscinas de agua recuperada, mientras que el relave se deposita en el tranque de relaves Laguna Seca con un 51% de sólidos.

2.2.7. CONCENTRADORA LAGUNA SECA LÍNEA 2

El diagrama de flujos para Laguna Seca Línea 2 en la Figura 3 muestra principalmente:

- 1) Alimentación de mineral desde *Stockpile*.
- 2) Molienda SAG y Clasificación en Harnero vibratorio.
- 3) Molienda en Molinos de Bolas
- 4) Clasificación en baterías de ciclones en circuito cerrado inverso.
- 5) Flotación *Rougher*.
- 6) Flotación de limpieza columnar *Rougher*.
- 7) Flotación de limpieza columnar *Scavenger*.
- 8) Flotación *Scavenger*.
- 9) Remolienda en molino vertical y clasificación en batería de ciclones.
- 10) Espesamiento de concentrados.
- 11) Espesamiento de relaves.

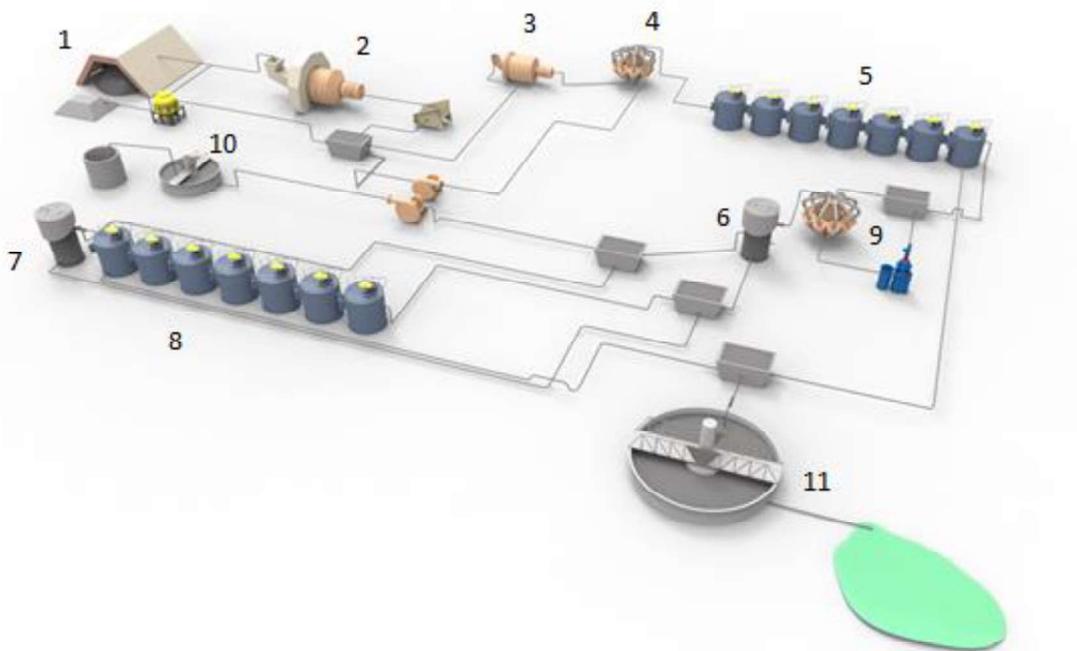


Figura 3: Diagrama de Procesos Concentradora Laguna Seca, Línea 2.

2.2.8. MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 2

La construcción de la Línea 2 consideró el circuito de molienda SAG-Molienda de bolas de la Línea 1 con un aumento en la capacidad nominal y en la dimensión de los equipo.

2.2.9. CIRCUITO DE FLOTACIÓN Y REMOLIENDA LAGUNA SECA LÍNEA 2

El *overflow* de los ciclones suministra de pulpa a la flotación *Rougher* en celdas de aire forzado, el concentrado *Rougher* pasa al circuito de clasificación en ciclones y remolienda en molinos *Vertimill*, el concentrado ya conminuido sigue a la flotación de limpieza en columnas *Rougher*, las colas de la limpieza *Rougher* alimentan a las celdas de flotación *Scavenger*, el concentrado *Scavenger* pasa al circuito de flotación de limpieza columnar *Scavenger*.

Las colas de la limpieza *Scavenger* retornan a la flotación *Scavenger*, en cambio que los concentrados de ambas limpiezas se juntan para ser espesados. Las colas *Rougher* y *Scavenger* son espesadas para posteriormente ser dispuestas en el tranque de relaves.

2.2.10. ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO Y RELAVE LÍNEA 2

El concentrado final es espesado en los TK-027 y TK-028 para recuperar agua de procesos y alcanzar el 65% de sólidos y así evitar el embancamiento del mineroducto.

El concentrado es llevado a la planta de filtro vía mineroducto hasta las instalaciones de Puerto Coloso para ser filtrado y embarcado con 9% de humedad.

El agua clara de los TK-021, TK-022, TK-027 y TK-028 pasa a separación sólido-líquido en el clarificador TK-029 para que el agua recuperada retorne a la Línea 1.

Mientras que el relave es espesado en los TK-014, TK-015 y TK-016, así el agua recuperada desde el relave retorna al proceso, mientras que el relave se deposita en el tranque de relaves Laguna Seca con un 51% de sólidos.

2.3. CONSUMO DE AGUA EN MINERIA

2.3.1. CONSUMO DE AGUA CONTINENTAL

Según Cochilco, la proyección de consumo de agua continental en la región de Antofagasta decrece en 55% (Figura 4) entre 2016 y 2028, donde la primera caída apreciable ocurre entre 2016 y 2020 debido al ingreso en operación de EWS. Luego, Posteriormente se observa otra brusca caída en el consumo de agua continental debido al cese de actividades de Chuquicamata a rajo abierto y a la impulsión de agua desalinizada a sus instalaciones.

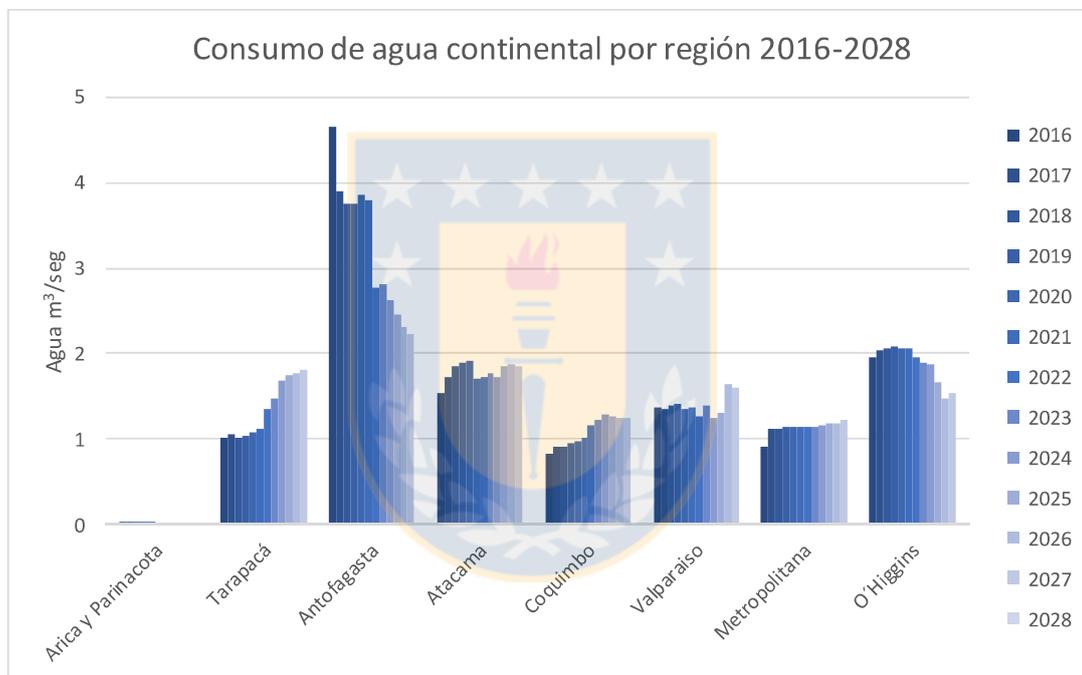


Figura 4: Consumo de agua continental por región 2016—2028. (Fuente: Cochilco, 2017)

2.3.2. CONSUMO DE AGUA DE MAR

Según Cochilco, la proyección de consumo de agua de mar en minería a nivel nacional (Figura 5), indica que alcanzará los $11,16 \frac{m^3}{seg}$ en 2028, representando un crecimiento del 289.0% respecto a los $2,87 \frac{m^3}{seg}$ consumidos durante 2016. Mientras que para la región de Antofagasta indica que su consumo alcanzará los $8,28 \frac{m^3}{seg}$ en 2028, cifra que representa un aumento de 248,5% respecto a los $2,38 \frac{m^3}{seg}$ consumidos durante 2016, este incremento se explica principalmente por las iniciativas de ampliación o puesta en marcha de distintos proyectos de plantas desalinizadoras como las plantas de BHP Escondida y Spence, Distrito Norte de Codelco,

la planta para suplir agua al proyecto Distrito Centinela de Antofagasta Minerals, y la extracción de agua de mar para la posible expansión de Sierra Gorda de KGHM.

Por parte de Minera Escondida, la inversión de capital durante 2006 alcanzó los US \$160 millones para la construcción de una planta desalinizadora con capacidad de producción de 1.900 $\frac{m^3}{h}$, mientras que la puesta en marcha de EWS de 9.000 $\frac{m^3}{h}$ de capacidad tuvo un costo de US\$3.430 millones en 2013.

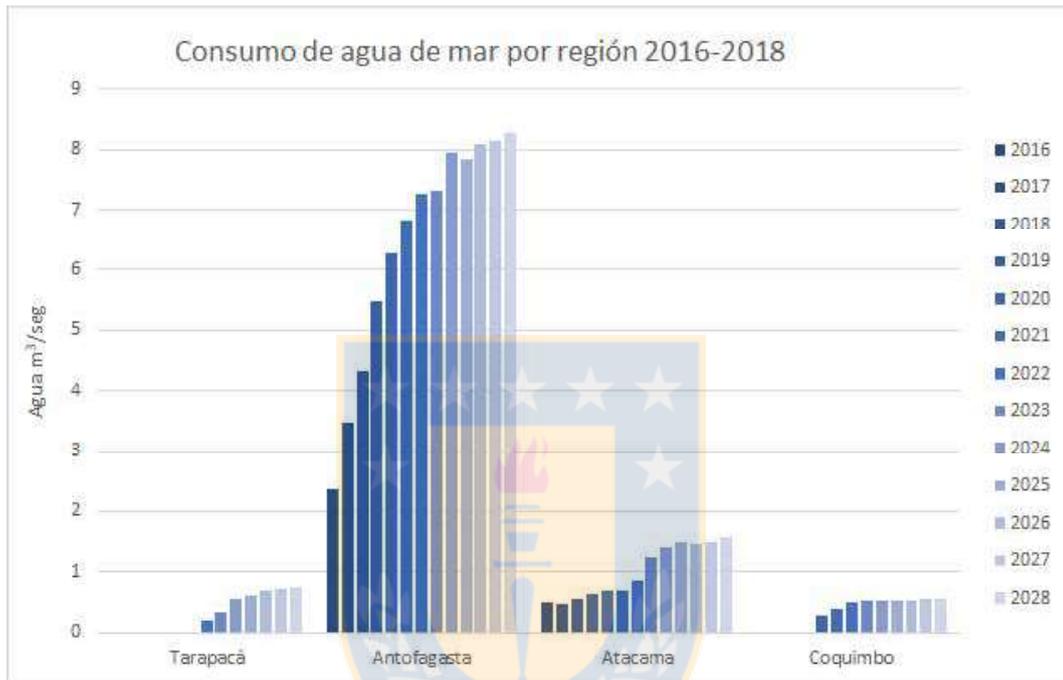


Figura 5: Consumo de agua de mar por región 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017)

El aumento proyectado en el consumo total de agua de mar es principalmente para abastecer a los procesos de concentración de minerales, según estadísticas de Cochilco, de los 11,16 $\frac{m^3}{seg}$ de agua de mar que se utilizarán en 2028, el agua utilizada para los procesos de concentración representa el 90% (Figura 6).

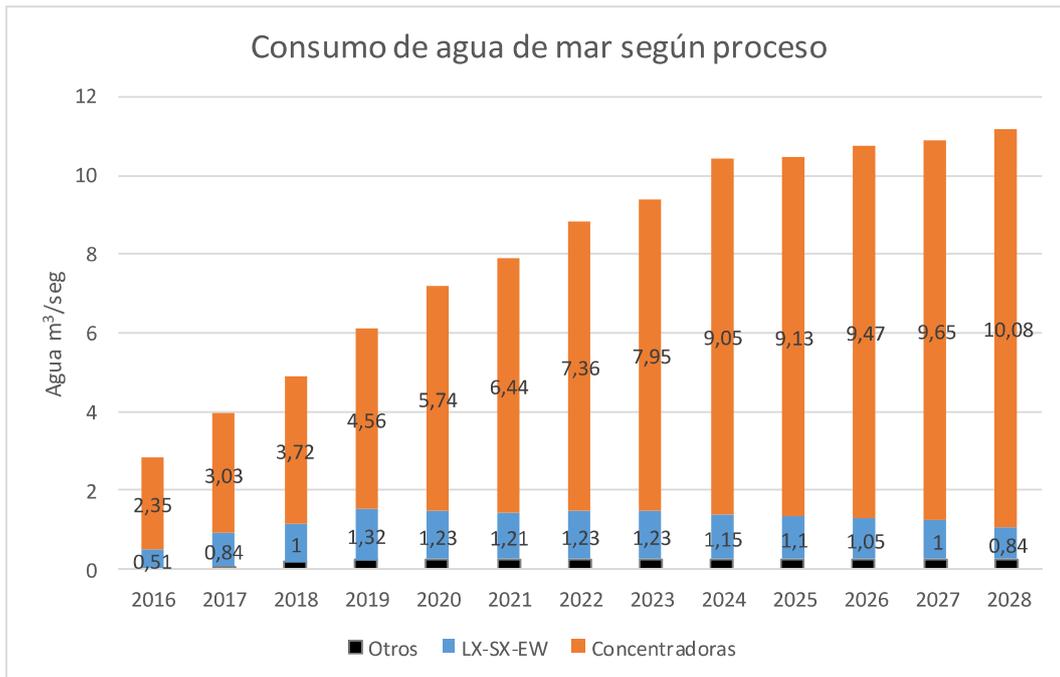


Figura 6: Consumo de agua de mar en minería según proceso 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017)

2.3.3. CONSUMO DE AGUA EN PROCESOS DE CONCENTRACIÓN

Los procesos de concentración de minerales requieren de un alto suministro de agua (Figura 7), siendo las etapas de conminución y clasificación las que necesitan de una mayor adición de agua.

Para el caso de Escondida, se utiliza principalmente para ajustar el Cp en la descarga del SAG a un 75% Sólidos y en la alimentación a las baterías de ciclones a 58.5% y 56.0% de sólidos respectivamente para Laguna Seca Línea 1 y Línea 2 respectivamente, con esto se asegura una alimentación a la flotación entre un 25 y 30% de sólidos.

En la etapa de espesamiento es donde se destinan los esfuerzos para recuperar una mayor cantidad de agua, es aquí donde parte importante del recurso hídrico pasa a formar parte del relave enviado a los tranques.

Dadas las condiciones geográficas y climáticas donde se encuentran las instalaciones de Escondida, la recuperación de agua se hace indispensable para asegurar el abastecimiento de agua y disminuir las pérdidas en el tranque, por lo que la optimización del espesamiento de relaves se hace fundamental.

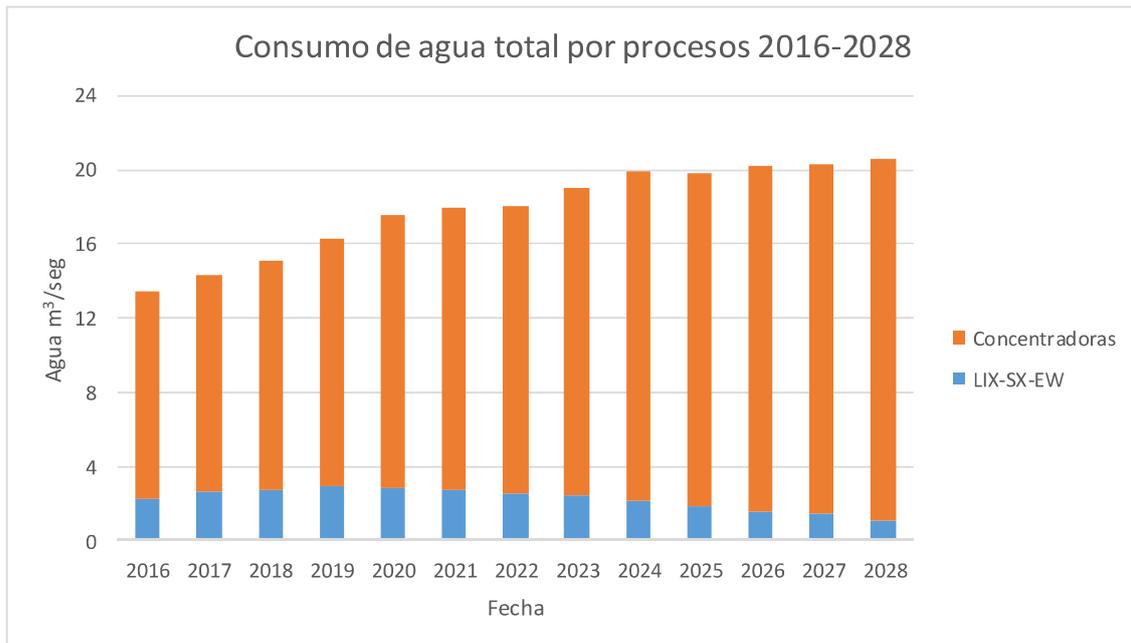


Figura 7: Consumo de agua total por procesos de concentración y LIX-SX-EW 2016-2028. (Fuente: Cochilco, 2017)

Para el caso de Minera Escondida, la cuantificación del consumo de agua fresca entre julio y diciembre de 2017 (Figura 8), se tiene un mayor consumo de agua fresca por parte de Laguna Seca Línea 2 que la Línea 1, debido principalmente a que la Línea 2 procesa más mineral y que además suministra agua fresca hacia la Línea 1.

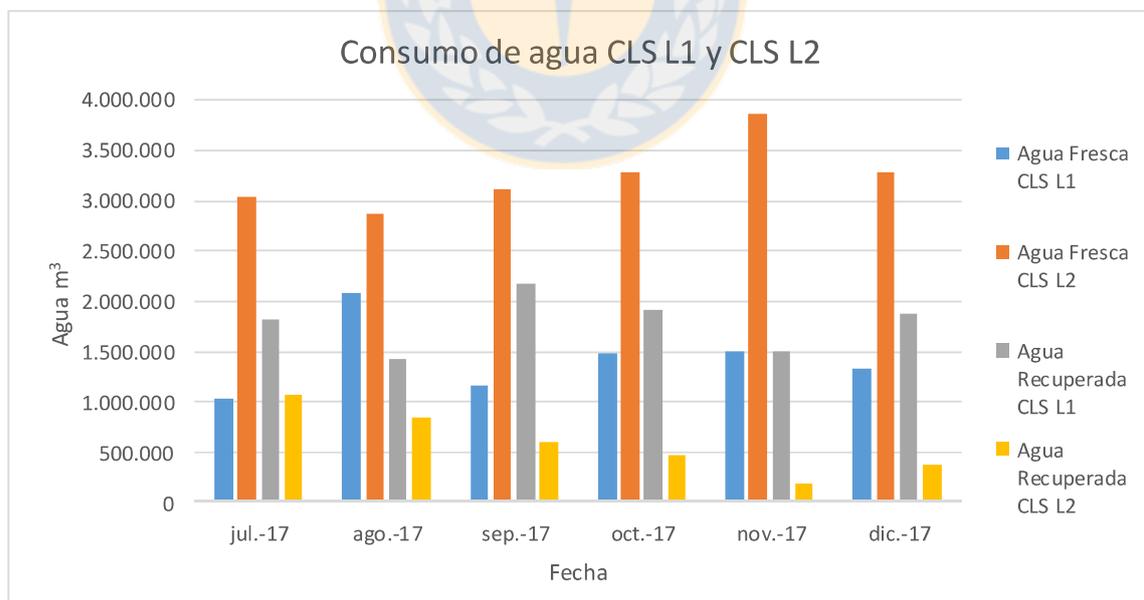


Figura 8: Consumo de agua para las concentradoras Laguna Seca L1 y Laguna Seca L2 entre julio y diciembre de 2017.

2.3.4. CONSUMO SECUNDARIO DE AGUA

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo y permanencia de la operación, siendo utilizada también para el enfriamiento de los sistemas de molienda, sellado de bombas, circuito de incendio, riego de caminos, lavado de equipos, limpieza de canaletas, preparación de reactivos, consumo del personal, entre otros.

2.3.5. AGUA FRESCA

Existen dos fuentes principales de agua fresca, las cuales pueden ser a su vez aguas continentales como los pozos de Monturaquí o agua de mar proveniente de EWS, las que alimentan a ambas plantas concentradoras de Laguna Seca.

La Línea 2 es la que cuenta con mayor flexibilidad de abastecimiento de agua fresca, ya que además recibe aportes desde los pozos de Hamburgo-Desaguadero de mina y la Desalinizadora Planta 0.

Las aguas frescas provenientes desde Monturaqui y el Reservorio de EWS se almacenan en los tanques de agua fresca TK-083 y TK-251 de la Línea 1 y Línea 2 respectivamente.

2.3.6. AGUA DE PROCESOS

Parte considerable del agua utilizada en las plantas concentradoras de Laguna Seca proviene desde los espesadores de relaves, donde el agua recuperada desde los *overflow* de los TK-006, TK-007 y TK-008 para la Línea 1 y TK-014, TK-015 y TK-016 para la Línea 2 van a parar a las piscinas de agua recuperada de cada línea, para posteriormente recircular al proceso siendo el principal suministro de agua para las etapas de Molienda SAG y Molienda Bolas.

2.4. ESTADO DEL ARTE

A fines de 2012, entra en fase de ejecución los PERFORMANCE TEST de LSD y la posterior puesta en marcha, con lo anterior inicia la operación del proyecto de expansión de la Línea 1. Posteriormente durante el 2014, la colaboradora Honeywell comienza la ejecución de "Balance de aguas Laguna Seca", proyecto finalizado en junio de 2015, con lo que se dispuso de reconciliación del balance de agua de suministro en línea cada 15 minutos, cálculos de *Make-Up* automatizado y despliegue gráfico de resultados para la Línea 1 (Figura 9).

Simultáneamente a este proyecto, se realizó el levantamiento de instrumentación existente a esa fecha para la Línea 1 y la incorporación de los *tag* en los sistemas de control de procesos. En esta misma fecha, se presentó la propuesta técnica-comercial para una iniciativa de similar envergadura en la Línea 2, este proyecto no se ejecutó.

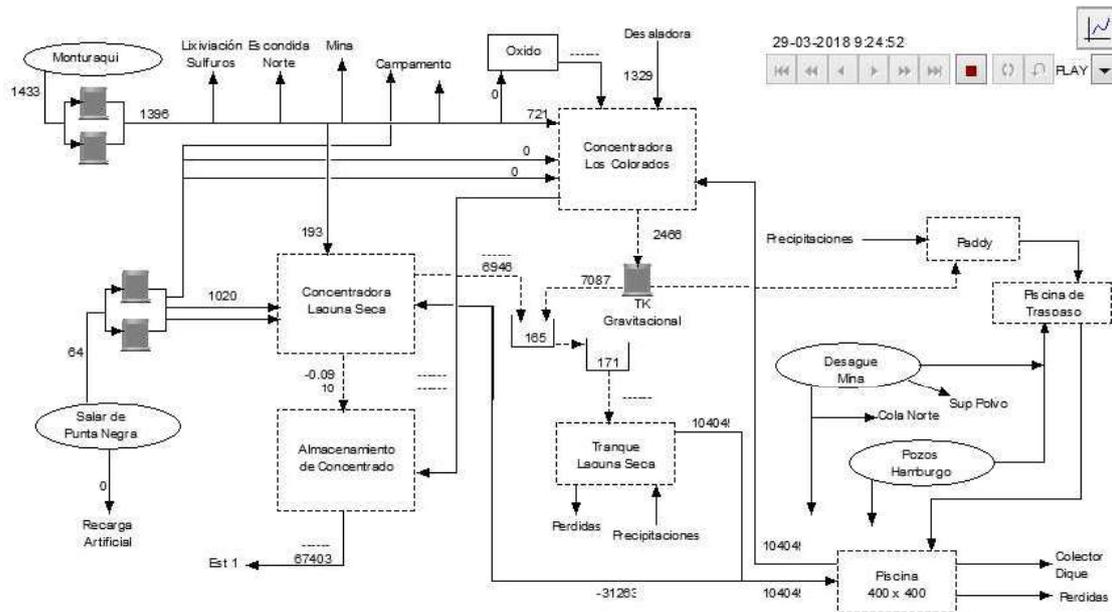


Figura 9: Balance general de agua en línea.

En este mismo lineamiento de cambios, EWS bombea por primera vez agua fresca durante 2016, reemplazando la alimentación de agua desde Salar de Punta Negra, modificaciones que no han sido actualizadas en la plataforma de Honeywell (Figura 9). A la fecha, CLS dispone de la plataforma PHD de Honeywell que reconcilia el balance en línea para la Línea 1, donde las variables de entrada y salida para dicho balance están desactualizadas, además de que no entrega información de la metodología utilizada para el cierre de nodos con flujos no medidos, estimación de errores ni la reconciliación de la data.

2.5. FUNDAMENTOS DEL BALANCE DE MASA

En palabras simples, un balance de masa es la aplicación de la ley de conservación de la masa al cuantificar las entradas y salidas de un sistema o parte de este, para el caso de los procesos metalúrgicos, los balances de masa son ampliamente utilizados desde etapas de ingeniería previa hasta la operación, optimización del proceso y contabilización de la producción.

2.5.1. BALANCE METALÚRGICO EN PLANTA CONCENTRADORA

Los balances de masa en procesos metalúrgicos son una aplicación de la ley de conservación de la masa en sistemas abiertos que involucran la interacción de distintos elementos, los cuales deben gobernarse independientemente por el cumplimiento de la ley.

Desde el punto de vista macro, en el caso de las plantas concentradoras como sistema, el balance de agua, mineral seco y cobre debe satisfacer independientemente la ley de conservación de la masa y al mismo tiempo el balance global de materia.

2.5.2. BALANCE DE MASA EN CIRCUITOS COMPLEJOS

El Balance de masa para circuitos complejos requiere de la representación en una serie de nodos en los cuales las corrientes del sistema se unan o se separan y de la definición de un método analítico que permita generar n ecuaciones (n igual al número de nodos) y m variables (m igual al número de corrientes o flujos) con el objetivo de resolver dichas ecuaciones.

Lo que se ejemplifica de forma más ilustrativa en la Figura 10 y Figura 11.

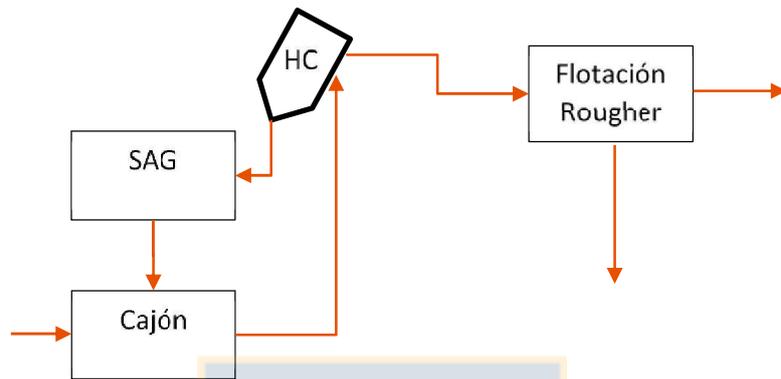


Figura 10: Diagrama de flujos simplificado para circuito de molienda cerrado inverso.

Lo que representado nodalmente queda como,

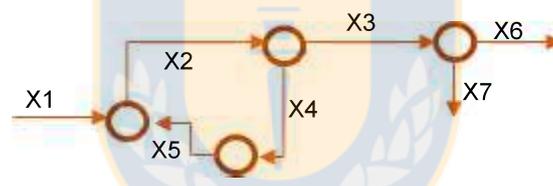


Figura 11: Representación nodal del diagrama de la Figura 5

Las ecuaciones de balance para la figura son,

$$X_1 - X_2 + X_5 = 0 \quad (1)$$

$$X_4 - X_5 = 0 \quad (2)$$

$$X_2 - X_3 - X_4 = 0 \quad (3)$$

$$X_3 - X_6 - X_7 = 0 \quad (4)$$

Lo que se expresa como la matriz de conexión C (Cutting, 1976) (citado en Wills, 2006)

$$C = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.6. RECONCILIACIÓN DEL BALANCE DE MATERIA

Si la data obtenida desde las mediciones tiene error asociado, es lógico esperar que el balance de masa no cierre, especialmente si la data se obtiene como medida indirecta a través de cálculos sobre las magnitudes medidas a causa de la propagación del error.

2.6.1. DETERMINACIÓN DEL ERROR DE MUESTREO

Para Narasimhan y Jordache (2000) los procesos de medición son inevitablemente malogrados por errores durante el muestreo, procesamiento y transmisión de la señal medida, errores que distorsionan los valores medidos respecto los valores reales de una variable de interés.

Se define el error total en la medición como la diferencia entre el valor medido y el valor real de la variable.

$$\text{error} = \text{valor medido} - \text{valor real} \quad (6)$$

Pudiéndose representar el error fundamentalmente como la contribución de dos tipos de error, los errores aleatorios y los errores gruesos (*random errors and gross errors*).

Respecto al error aleatorio y error grueso Narasimhan y Jordache (2000) describen lo siguiente:

2.6.2. ERROR ALEATORIO

Es el error cuya magnitud ni signo se pueden predecir con certeza, es decir, si la medición es repetida con el mismo instrumento bajo idénticas condiciones de proceso, se puede obtener un valor diferente dependiendo del resultado del error aleatorio, donde la única forma de caracterizar este error es utilizando distribución de probabilidades.

El error aleatorio no puede ser eliminado completamente y estará siempre presente en las mediciones.

2.6.3. ERROR GRUESO

Este tipo de error es causado por eventos no aleatorios como el estado deficiente de la instrumentación como por ejemplo la instalación inapropiada de dispositivos de medición, descalibración, corrosión de sensores y depósitos o incrustación de sólidos.

Si se realizan sucesivas mediciones sobre un valor fijo, la contribución del error grueso en la data será siempre en igual magnitud, donde la frecuencia de ocurrencia de los errores gruesos son menores, pero sus magnitudes son típicamente mayores que el error aleatorio.

2.6.4. PROPAGACIÓN DEL ERROR EN CALCULOS INDIRECTOS

Según Zuñiga (2003), el cálculo indirecto de magnitudes a partir de mediciones independientes supone una propagación de los errores de cada medición.

Sean las mediciones a, b, \dots, z con errores $\delta a, \delta b, \dots, \delta z$ usadas para calcular q .

$$q = f(a, b, \dots, z) \quad (7)$$

El error de q se define

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \delta b\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \delta z\right)^2} \quad (8)$$

2.6.5. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DE PESO

La reconciliación de datos considera ajustar los valores medidos en un sistema restringido por ecuaciones de balance másico, el método de Lagrange pondera el ajuste según el peso de las variables en el sistema. Kracht y Casali (2011) utilizan la metodología de los multiplicadores de Lagrange y exponen que el factor de peso de la variable se define como el grado de incertidumbre o confianza de la medición, la solución obtenida dependerá fuertemente del vector inicial y este a su vez considera al factor de peso W_i .

Donde una buena elección como factor de peso W_i puede ser el inverso de la varianza.

$$W_i = \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (9)$$

Con,

σ_x^2 : Varianza de la medición

2.6.6. MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

Los multiplicadores de Lagrange son un método matemático que mediante la aplicación de la teoría del cálculo derivacional permite encontrar los máximos y mínimos de una función.

Razón por la cual, son ampliamente empleado como método de reconciliación de data y optimización para procesos industriales, siendo utilizados en esta ocasión para satisfacer la ley de conservación de la masa en el balance de agua en Laguna Seca L1 y L2.

Siguiendo la metodología utilizada por Gutierrez (2017) para reconciliar los datos, se tiene que el método de los multiplicadores de Lagrange busca minimizar el cuadrado de las diferencias

entre variables medidas y calculadas, ponderando un factor de peso, que básicamente indica el nivel de incertidumbre o confiabilidad de la medición.

Donde, el sistema algebraico de los multiplicadores de Lagrange a resolver es,

$$\sum_{i=1}^m W_i F_i + \sum_{j=1}^n \lambda_j \sum_{i=1}^m K_{ij} = \sum_{i=1}^m W_i f_i \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_{ij} F_i = 0 \quad (11)$$

f_i : Valor medido o experimental para el flujo i

F_i : Valor ajustado para el flujo i

W_i : Factor de peso de la variable

m : Número de variables independientes

n : Número de nodo

K_{ij} : Parámetros o coeficientes de la j – esima restricción en el flujo i

λ_j : Multiplicador de Lagrange

2.7. ESTADO DE INSTRUMENTACIÓN EN LAGUNA SECA

2.7.1. FLUJÓMETROS

Para el caso de los flujómetros de agua y pulpa, el ensuciamiento por incrustación y depósito de sólidos en suspensión es la fuente principal del error grueso.

Para controlar el error grueso se recomiendan un exhaustivo plan de seguimiento de los procedimientos de instalación, contrastación y mantención de la instrumentación.

Se constató que el error por descalibración no se considera en los planes de mantención de estos equipos, realizándose solo limpieza y contrastación de los instrumentos en periodos de detención de planta, por lo tanto, la magnitud del error grueso puede ser subestimada y está en constante aumento durante los largos periodos de tiempo que comprenden los intervalos entre las paradas mayores de mantención programada.

A consecuencia de estos errores en medición, la planta puede resentir un significativo deterioro en su performance, lo que desde el punto de vista del control de procesos puede anular la ganancia obtenida por optimización de los procesos.

Económicamente hablando, la data errónea puede arrastrar al proceso a un régimen desfavorable o generar condiciones de operación inseguras, lo que para el caso del balance de agua se evidencia al observar discrepancias entre los Cp de alimentación *Rougher*, o importantes

diferencias entre la cantidad de relave producido calculado por balance metalúrgico respecto mediciones de caudal de relave.

Las Tablas 1 y 3 muestran los equipos de medición de flujos de entrada y salida de agua al proceso, donde es importante destacar la inexistencia de flujómetros en la alimentación a los espesadores de concentrado para ambas concentradoras.

Cabe destacar que la Línea 1 cuenta con 10 flujómetros para el agua de lavado en la flotación columnar que de manera intencionada se adjuntan en la Tabla 2, esto debido al alto grado de incrustación de las líneas de agua de lavado y que prácticamente estas líneas de agua están fuera de servicio, siendo suministrada el agua de lavado a través de un sistema provisorio que no cuenta con flujómetros. En cambio, la situación del agua de lavado columnar para la Línea 2 es de total incertidumbre por lo que para el cierre del balance se agregan valores de diseño.

Tabla 1: Instrumentación disponible para medición de caudal Línea 1.

Instrumentación Disponible Mediciones de Caudal					
Ubicación	Fabricante	Modelo	Tipo	Condición	Diámetro
SAG 4	ABB	Process Master 300	Magnético		20"
Trommel	KROHNE	IFC 90	Magnético		16"
Harnero	E+H	Promag 50W	Magnético		12"
SU-101	E+H	Promag 50P	Magnético		24"
SU-102	E+H	Promag 50P	Magnético		24"
SU-103	ABB	Process Master 300	Magnético		24"
SU-104	CIDRA	SONARtrack	Sonar		24"
CS-001	CIDRA	SONARtrack	Sonar		36"
CS-002	CIDRA	SONARtrack	Sonar	No Disponible	36"
CS-003	CIDRA	SONARtrack	Sonar	No Disponible	36"
CS-004	CIDRA	SONARtrack	Sonar	No Disponible	40"
TK-006	E+H	Hold	Magnético		24"
TK-006	Fischer & Porter	10 DX	Magnético		24"
TK-007	Fischer & Porter	10 DX	Magnético		24"
TK-007	Fischer & Porter	10 DX	Magnético		24"
TK-008	Fischer & Porter	10 DX	Magnético		24"
TK-008	ABB	Hold	Magnético		24"

Tabla 2: Flujómetros agua de lavado columnar Línea 1

Ubicación	Fabricante	Modelo	Tipo	Diámetro
Celda columnar 0320-FT-301	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-302	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-312	E+H	Promag 33	Magnético	4"
Celda columnar 0320-FT-314	E+H	Promag 33	Magnético	4"



Tabla 3: Instrumentación disponible para medición de caudal Línea 2.

Ubicación	Fabricante	Modelo	Tipo	Diámetro
SAG 5	ABB	Process Master 300	Magnético	24"
Trommel	KROHNE	IFC 90	Magnético	16"
Harnero	E+H	Promag 50W	Magnético	12"
SU-105	CIDRA	SONARtrack	Sonar	24"
SU-106	CIDRA	SONARtrack	Sonar	24"
SU-107	CIDRA	SONARtrack	Sonar	24"
SU-108	CIDRA	SONARtrack	Sonar	24"
CS-012	CIDRA	SONARtrack	Sonar	36"
CS-013	CIDRA	SONARtrack	Sonar	36"
CS-014	CIDRA	SONARtrack	Sonar	36"
CS-015	CIDRA	SONARtrack	Sonar	40"
TK-014	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"
TK-014	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"
TK-015	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"
TK-015	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"
TK-016	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"
TK-016	Fisher & Porter	10 DX	Magnético	24"

2.7.2. DATOS BALANCE ESPESAMIENTO DE RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 1

Como se enunció en la sección 3.2. "Definición de Parámetros y Variables", se deben linealizar los espesadores en torno a la operación, el problema radica en la poca fiabilidad de los datos entregados por la instrumentación en las etapas de espesamiento, lo que dificulta el modelamiento del subsistema de manejo de relaves. Esta situación afecta negativamente el cumplimiento de los objetivos de la memoria de título, debido a que una de las principales modificaciones en las líneas de agua de proceso se realizó en la descarga del *overflow* del espesador de relaves TK-008 y debe incluirse esta modificación en la actualización de la malla de balance.

Si se analiza la Figura 12, la cual presenta un resumen gráfico del análisis estadístico de la base de datos histórica de los últimos meses para la descarga de agua clara del TK-008, se observa una gran variabilidad, notándose por ejemplo que la desviación estándar de la muestra es de $6.259 m^3$, además de que la mayor densidad de mediciones se encuentra en torno a valores nulos y $6.000 m^3$, lo que claramente se encuentra alejado de rangos operacionales y criterios de diseño.

Otro punto a destacar es que el valor máximo reportado en la base de datos es de $30.211 m^3$, lo que comparado a los $64.625 m^3$ de agua recuperada por espesador según criterios de diseño representa sólo un 46,75%.

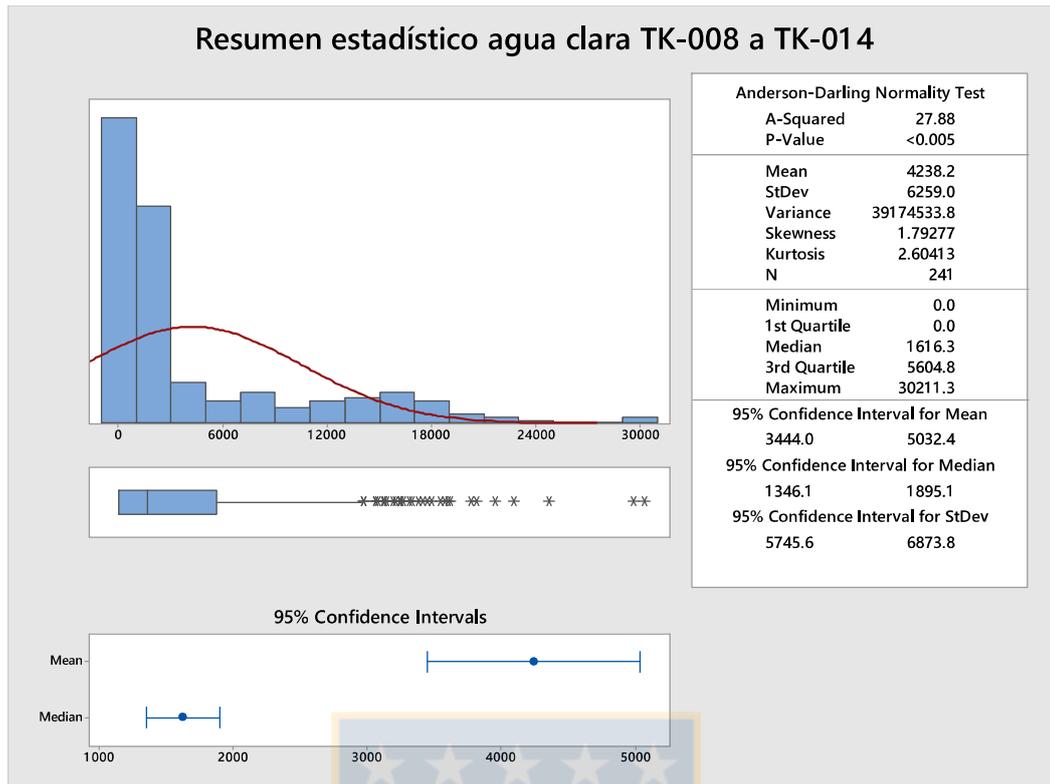


Figura 12: Resumen gráfico del análisis estadístico de la data sin filtrar de descarga de agua clara del TK-008.

2.7.3. DATOS BALANCE ESPESAMIENTO DE RELAVES LAGUNA SECA LÍNEA 2

El caso del balance en el espesamiento de relaves es aún peor que el de la Línea 1, por lo que fue necesario estimar a partir del nivel de llenado y el diseño de la canaleta el volumen de agua recuperado desde cada espesador.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. RESOLUCIÓN DEL BALANCE

Deiana et Al (2018) enuncian una metodología empleada para la búsqueda de resolución del balance de forma sistemática y ordenada, siendo necesario aclarar que en la Tabla 4 se define una lista de verificación que asegura el cierre del proyecto, no siendo necesario seguir irrestrictamente el orden propuesto y pudiéndose, dependiendo de la ocasión, repetir uno o más pasos con motivo de conseguir la resolución del problema.

Tabla 4: Lista de verificación para cierre de balance de masa.

Diagrama de procesos	Se definen los diagramas de los procesos a estudiar, de forma que su comprensión sea simple, representando los flujos mediante flechas, y los subsistemas como círculos o cajas.
Rotulado de variables	Se rotulan las variables conocidas, calculadas y desconocidas.
Definición de la base de cálculo	En el caso de este balance, se define como Base de cálculo de tiempo <ul style="list-style-type: none"> • TD de 08:00 a 20:00 del dd/mm/aaaa • TN de 20:00 a 08:00 del dd/mm/aaaa Base de cálculo de balance <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de mineral fresco más Pebble recirculado a SAG.
Escribir ecuaciones de balance	Escribir las ecuaciones de balance respecto a variables medidas y calculadas, luego determinar si el sistema cuenta con igual número de variables desconocidas que ecuaciones.
Resolver las ecuaciones	Se introduce los valores medidos y valores calculados a las ecuaciones de balance que determinan el sistema.
Verificación de Resultados	Se verifica que las respuestas del balance tengan un sentido lógico que represente el sistema estudiado.
Reconciliación del balance	Utilizando el método de multiplicadores de Lagrange, se emplea un modelo de ajuste secuencial para el sistema.

3.1.2. MODELAMIENTO DE MALLAS DE BALANCE

El desarrollo del modelamiento de las mallas nodales para el balance de agua en ambas concentradoras consideró distintos escenarios de cálculo, iniciando con el balance por capacidad de tratamiento nominal y ajuste de parámetros de diseño bajo la suposición que el límite operacional lo entregan los equipos SAG para ambas concentradoras, y conforme esto, el dimensionamiento de etapas posteriores es acorde a los requerimientos de capacidad de los molinos semi autógenos. Consiguiéndose de esta forma un balance de sólido y agua acorde a un sistema ideal que es la base de comparación para los resultados expuestos a lo largo de esta memoria de título.

Posteriormente, se construyeron plantillas en ambiente Excel y la representación mediante diagramas de los subsistemas a determinar mediante las ecuaciones de balance, las que se observan como ejemplos en las Figuras 13 y 14 incluyéndose la rotulación de las variables medidas (para acceder a los diagramas de forma más acabada revisar los Anexos 7.4 y 7.5).

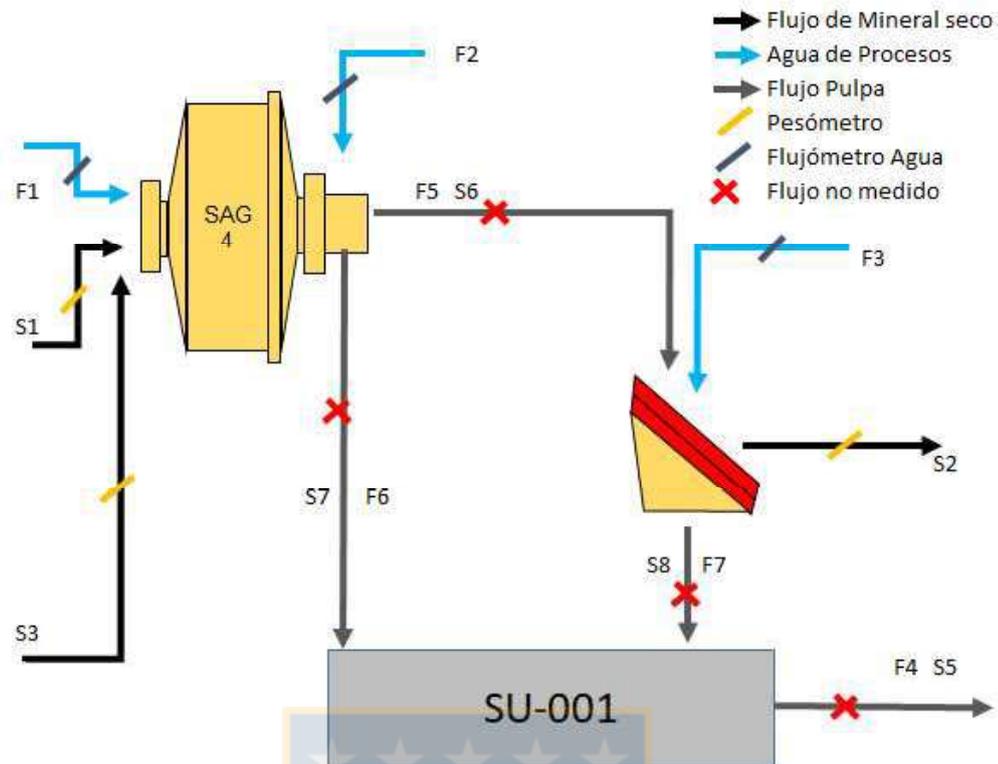


Figura 14: Ejemplo de diagrama circuito SAG 4, CLS L1.

3.1.3. LEVANTAMIENTO DE DATOS

Se verificó en terreno la existencia y condición de la instrumentación para ambas concentradoras (Tablas 1, 2 y 3), se actualizó información sobre la data no disponible en línea (Anexos 7.4 y 7.5), señales en mala calidad y además se levantaron los avisos correspondientes sobre instrumentación y data deficiente.



Figura 15: Ejemplo de flujómetro para alimentación de agua de procesos a SAG 4, CLS L1.

La comparación del balance de diseño con el levantamiento de información sobre el estado de instrumentación y medición, suponen desde el inicio dificultades para el cierre nodal del balance interno, principalmente por falta de capacidad de medición de flujos y parámetros metalúrgicos que determinen el sistema por completo, es por esta razón que se decidió la revisión y modificación constante de las mallas de balance conforme a los constantes hallazgos.

3.1.4. BASE DE DATOS

Utilizando el *software* Uniformance Process Studio y su interface de extracción y lectura de data PHD, se recopila una base de datos histórica de los últimos 6 meses. Para esto se activó la pestaña Uniformance como complemento de Excel, se ejecutó la función Data desplegándose la pantalla de trabajo (Figura 16), se ingresaron las fechas de inicio y final del intervalo para el cual se llaman los datos, la frecuencia de lectura en segundos, minutos, horas o días según corresponda, el *tag* asociado a la variable de proceso en cuestión y el formato en el que se quiere visualizar la información, obteniéndose una columna compuesta por una serie temporal de datos asociados a la función PHDGetData.

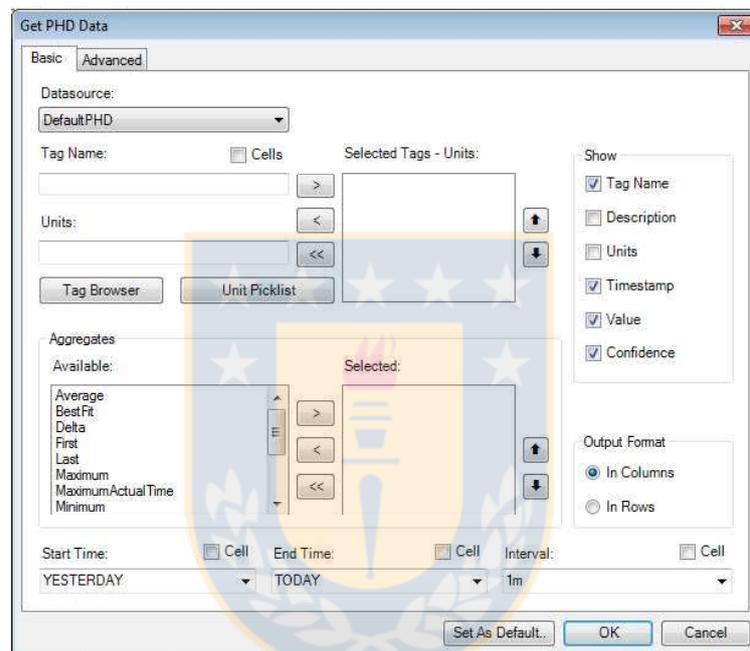


Figura 16: Pantalla de trabajo PHD.

3.1.5. TRATAMIENTO DE DATOS Y ESTIMACIÓN DEL ERROR

Con objeto de asignar el factor de peso a las variables medidas y calculadas para la reconciliación del balance, se realiza el análisis de las series temporales de datos, lo que permite establecer filtros según parámetros de operación. De esta forma se excluyen mediciones de datos anómalos, obteniéndose data estadísticamente más fiable.

Cómo se explicó anteriormente en la sección 2.6.1. en, “*Determinación del error de muestreo*”, las mediciones están sujetas a error, para estimar dicho error se consideró el error grueso asociado a la capacidad de muestreo de cada equipo, definidas en las fichas técnicas de cada instrumento y también se consideró la variabilidad de la operación, la que en este caso representa la dispersión de la muestra.

Posteriormente, para las variables que son obtenidas a través de cálculos indirectos, se procede a realizar la estimación del error mediante la aplicación de la teoría de propagación del

error (Ecuación 8). Al considerar la dispersión de la data en esta metodología de tratamiento de la información, se obtiene una herramienta que se ajusta de forma dinámica al estado de la operación.

3.1.6. BALANCE DE MASA

El balance de masa está construido de forma tal, que la planilla solicita desde el servidor la información del día a estudiar, construyendo columnas temporales que representan el detalle del desempeño operacional.

Luego de filtrar la data anómala y se calculan las variables indirectas, la planilla realiza la sumatoria de las corrientes, consiguiéndose así el balance de materia diario de cada planta.

3.1.7. BALANCE DE MASA DE SÓLIDOS

Para llevar a cabo el desarrollo del balance de agua, se construyó un balance y reconciliación de sólidos y de finos para ambas plantas concentradoras a partir de los muestreos diarios y análisis químicos en Línea, balance que al complementarse con la información recabada desde los flujómetros permite el cierre y reconciliación del balance de agua.

El balance de sólidos en estado estacionario se calcula a partir de la información entregada por los pesómetros en las correas de alimentación de mineral fresco, además de los pesómetros en las correas de *pebbles* generados y recirculados, incluyendo además información de leyes de cobre y porcentaje de sólido en las corrientes medidas en los circuitos de flotación de Laguna Seca Línea 1 y Línea 2, caracterizando principalmente los nodos de balance de molienda SAG, flotación y espesamiento (Anexos 7.4. y 7.5.).

La importancia del balance de sólidos para el desarrollo de esta memoria de título radica en que la determinación del balance de sólidos y convergencia del método de ajuste es relevante para el cierre del balance de agua, teniendo el balance de agua total dependencia sobre los resultados obtenidos por el balance de sólidos.

3.1.8. BALANCE DE MASA DE AGUA

Posterior al balance de sólidos, se desarrolla el balance de agua y la reconciliación de las corrientes, incluyendo implícitamente en el método matemático los resultados obtenidos en el balance de sólidos y de cobre fino de ambas concentradoras.

3.1.9. RECONCILIACIÓN DEL BALANCE

Para la reconciliación del balance de agua se utilizó el método de multiplicadores de Lagrange, verificándose la convergencia del vector solución. Con estos resultados, se confeccionaron planillas estándar de reconciliación del balance, considerando los factores de peso calculados por estimación del error de muestreo.

3.2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES

3.2.1. BALANCE DE DISEÑO LAGUNA SECA LÍNEA 1

La revisión del balance por capacidad nominal para Laguna Seca Línea 1 revela la pretensión de procesar un gran tonelaje de mineral con un suministro mínimo de agua fresca y de procesos, para lo cual se diseñó un circuito de molienda que alimente a la flotación con 33% de sólidos, esto se debe a que la planta se pensó inicialmente para 3 molinos de bolas, 4 molinos de remolienda y 3 filas de flotación primera Limpieza-*Scavenger*, capacidades que posteriormente fueron ampliadas en el proyecto LSD sin considerar un aumento en la cantidad de agua de suministro.

Por lo que posteriormente con la entrada de Laguna Seca Línea 2, se incorpora un importante traspaso de agua para satisfacer los requerimientos de esta ampliación en la capacidad productiva, esto conduce a que la existencia de agua para el procesamiento de minerales sea limitada desde etapas de diseño, donde se definen por ejemplo que las colas *Rougher* consideran un Cp de 33.6% de Sólidos y las colas finales un Cp de 30,9% (Tabla 5).

Además, se tiene como parámetro de diseño la adición de aproximadamente 19.200 m³ de agua de dilución a la etapa de remolienda y 15.700 m³ de agua de lavado en la limpieza columnar a diario, lo que representa una importante cantidad de agua de entrada no medida para el balance en la etapa de flotación.

3.2.2. BALANCE DE DISEÑO LAGUNA SECA LÍNEA 2

El dimensionamiento y construcción de Laguna Seca Línea 2 nació a partir de los aprendizajes adquiridos de la puesta en marcha y operación de la Línea 1, evidenciándose el diseño espejo del circuito de molienda SAG y secundaria.

Un análisis exhaustivo y comparativo entre ambos circuitos de molienda, visualiza que el aumento en la capacidad de tratamiento se debe principalmente a una mayor disponibilidad de agua de procesos, viéndose esto reflejado en el diseño de la Línea 2, el que se pensó con Cp menores a los de Línea 1.

En cuanto al circuito de flotación, el diagrama de flujos de Laguna Seca Línea 2 es más bien un híbrido entre los diagramas de Los Colorados y Laguna Seca Línea 1.

Se puede notar en la Tabla 8 que según diseño existe la adición de un flujo de agua de dilución a la alimentación de la limpieza *Scavenger* de 7.800 m³ y un flujo de agua de dilución en la remolienda cercano a 19.300 m³ al día.

Tabla 5: Parámetros de diseño y operación para Laguna Seca Línea 1.

Parámetros de operación Laguna Seca Línea 1		
	Cp Diseño	Cp Operación
Descarga SAG 4	75,0%	73,0%
Alimentación Ciclones	58,5%	60,0%
Underflow ciclones	75,0%	80,0%
Overflow ciclones	33,0%	30,0%
Descarga Molinos de Bolas	75,0%	75,0%
Alimentación Rougher	33,0%	30,0%
Concentrado Rougher	30,3%	
Colas Rougher	33,6%	
Alimentación Remolienda	25,1%	
Overflow Remolienda	21,3%	22,0%
Alimentación 1° limpieza	19,9%	
Concentrado 1° Limpieza	23,1%	27,0%
Alimentación Scavenger	17,9%	22,0%
Colas Scavenger	19,5%	
Concentrado Scavenger	13,3%	
Colas finales	30,9%	
Concentrado final	28,0%	
Descarga espesadores de relaves	51,0%	53,0%
Descarga espesadores de concentrado	65,0%	65,0%

Tabla 6: Suministro de agua según parámetros de diseño y capacidad de tratamiento nominal para Laguna Seca Línea 1

Suministro agua de procesos Laguna Seca Línea 1	m ³ /d Agua
Agua Procesos SAG 4	50.000
Agua Trommel	7.200
Agua Harnero	4.800
Agua Procesos Molienda Bolas	242.000
Agua Dilución Remolienda	19.300
Agua Lavado Limpieza Columnar	15.750
Agua Spray	11.000
Agua Floculante	10.000
Overflow TK-006	64.625
Overflow TK-007	64.625
Overflow TK-008	64.625
Descarga TK-006	46.300
Descarga TK-007	46.300
Descarga TK-008	46.300
Overflow TK-021	11.000
Overflow TK-022	11.000

Tabla 7: Parámetros de diseño y operación para Laguna Seca Línea 2.

Parámetros de operación Laguna Seca Línea 2		
	Cp	Cp
	Diseño	Operación
Descarga SAG 5	75,0%	73,0%
Alimentación Ciclones	56,1%	60,0%
Underflow Ciclones	75,0%	80,0%
Overflow Ciclones	29,9%	30,0%
Descarga Molinos de bolas	75,0%	75,0%
Alimentación Rougher	29,9%	27,0%
Concentrado Rougher	25,0%	
Colas Rougher	30,7%	
Overflow Remolienda	19,7%	22,0%
Concentrado limpieza Rougher	28,0%	
Cola Limpieza Rougher	17,2%	
Concentrado Limpieza Scavenger	28,0%	
Alimentación Scavenger	17,4%	22,0%
Colas Scavenger	13,9%	
Concentrado Scavenger	20,0%	20,0%
Colas finales	27,6%	
concentrado final	28,0%	
Descarga Espesadores de Relave	51,0%	53,0%
Descarga Espesadores de Concentrado	65,0%	65,0%

Tabla 8: Suministro de agua según parámetros de diseño y capacidad de tratamiento nominal para Laguna Seca Línea 2.

Suministro agua de procesos Laguna Seca Línea 2	m ³ /d Agua
Agua Procesos SAG 5	53.350
Agua Trommel	7.200
Agua Harnero	19.200
Agua Procesos Molienda Bolas	295.500
Agua Dilución Remolienda	21.150
Agua Lavado Limpieza Rougher	9.600
Agua Lavado Limpieza Scavenger	6.840
Agua Dilución Limpieza Scavenger	7.740
Agua Dilución TK-014	3.550
Agua Dilución TK-015	3.550
Agua Dilución TK-016	3.550
Overflow TK-014	89.940
Overflow TK-015	89.940
Overflow TK-016	89.940
Descarga TK-014	49.710
Descarga TK-015	49.710
Descarga TK-016	49.710
Agua Spray TK-027	10.660
Overflow TK-027	10.175
Overflow TK-028	10.175
Descarga TK-027	1.285
Descarga TK-028	1.285

Los parámetros de diseño para Laguna Seca Línea 1 y Línea 2 (Tabla 5 y Tabla 7), proporcionan los principales parámetros para la operación y control de ambas plantas procesadoras de mineral, por lo que también son parámetros comparativos que deben satisfacer los balances de agua, tanto como para etapas parciales como para el balance global.

3.2.3. BASE DE CÁLCULO TEMPORAL

Para motivos de cálculo, se define la distribución por turnos como el intervalo temporal para el cual se desarrolla el balance de agua, de esta manera los resultados pueden tener una interpretación más lógica y además pueden ser comparados con la información reportada en el análisis a los compósitos diarios.

Definiéndose el turno día desde las 08:00 am hasta las 20:00 pm y el turno noche desde las 20:00 pm hasta las 08:00 am del otro día.

3.2.4. BASE DE CÁLCULO POR CAPACIDAD DE TRATAMIENTO

Al igual que en los criterios de diseño de ambas plantas concentradoras, este balance considera la capacidad de tratamiento de mineral en la molienda SAG (Mineral fresco desde *Stockpile* más mineral proveniente de chancado de *Pebble*) como la base de cálculo, así el balance de agua y los C_p se determinan en función a la operación y su variabilidad.

3.2.5. CIRCUITO DE MOLIENDA SAG

Para motivos de cierre del sistema de ecuaciones de balance en estado estacionario, se calcula la masa de pulpa a molienda bolas como la suma y/o resta según corresponda de todas las variables de entrada y salidas conocidas.

3.2.6. MOLIENDA SECUNDARIA

Para el caso de la molienda secundaria, se tiene medición de todos los valores de entrada de agua al sistema, por lo que para motivos de cálculo se realiza la suposición de que el valor de la corriente de sólido en los *overflow* en las baterías de ciclones es igual a la alimentación fresca proveniente del bajotamaño del SAG.

Para el caso de la Línea 2, bajo la misma suposición anterior se puede cerrar el subsistema ajustando el balance por cálculo de carga circulante en el circuito de molienda, utilizando la medición de los flujómetros de pulpa a las baterías de ciclones.

3.2.7. FLOTACIÓN

Para la Línea 1, la pulpa proveniente de molienda secundaria y el valor de C_p calculado desde la información colectada por pesómetros y flujómetros se ajusta respecto a la medición de C_p en la alimentación a la flotación *Rougher* por análisis químico.

En cambio, para la Línea 2 se ajusta el *overflow* de las baterías de ciclones comparándolo con una estimación indirecta desde nivel de canaleta y velocidad de la pulpa en la canaleta de alimentación a la flotación *Rougher* y el Cp de alimentación a la flotación *Rougher* por análisis químico.

Además, dado que las etapas de flotación para ambas plantas concentradoras no cuentan con instrumentación para medición de flujos, se realiza el cierre del subsistema a partir del balance metalúrgico. Esto implica que el balance de agua depende fuertemente de la fiabilidad de la información entregada por las sondas de análisis químico.

Dado el estado de la instrumentación en la flotación, se tiene que para la Línea 1 el cierre nodal del balance se realiza únicamente para la flotación *Rougher* y balance global, suponiéndose además el factor de diseño que indica que las colas de la flotación *scavenger* representan un 13.5% de los relaves de la flotación *Rougher*, este factor permite el ajuste de relaves finales que irán a la etapa de espesamiento, pero supone un importante factor de distorsión al balance de colas.

En cambio, para la Línea 2 la situación del muestreo y análisis químico es ventajosa a la de la Línea 1 permitiendo cerrar el balance de la etapa *Rougher* y el cierre tanto del balance de la etapa de limpieza y colas finales.

3.2.8. ESPEADORES DE RELAVES Y CONCENTRADO

La inclusión de espesadores de relave y concentrado en el balance estacionario de agua, implica la suposición de linealización del modelo de acumulación del espesador en torno a la operación, esto significa la introducción de una variable de perturbación a la propagación del error relevante para el sistema.

Por una parte, la inclusión de los espesadores al balance permite ajustar respecto al tratamiento la cantidad de agua recuperada en los *overflow* de los espesadores, por otra, la dependencia de los espesadores con el balance y ajuste de la flotación distorsionan fuertemente los valores ajustados, sobre todo el ajuste de las toneladas de concentrado final y un prorrateo de la diferencia en la alimentación a los espesadores de relaves.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El levantamiento de datos arrojó deficiencias en la medición de flujos de agua de procesos para la flotación de ambas líneas, condicionando fuertemente la dependencia del cierre nodal al balance de los flujos pasantes por las baterías de ciclones de molienda de bolas y al balance metalúrgico obtenido desde los datos entregados por los cajones muestreadores.

Lo anteriormente descrito, implicó la considerable disminución de ecuaciones y nodos en el modelo, lo que restringió las dimensiones de los sistemas a determinar.

Se observa además, que la convergencia del método de reconciliación es fuertemente dependientes del vector inicial, número de variables, cantidad de nodos y de la quasi-singularidad de la matriz que contiene el sistema de ecuaciones.

Parte importante del desarrollo del proyecto fue el cierre y ajuste del balance de diseño para capacidad nominal de ambas plantas, considerando la condición de diseño de etapas unitarias respecto a la capacidad de tratamiento de la molienda SAG, y posteriormente al cálculo del agua requerida por etapa según C_p y SG de pulpa definidos como parámetros de diseño.

4.2. BALANCE Y RECONCILIACIÓN DE SÓLIDOS

Parte importante de este trabajo son los resultados del cierre y reconciliación del balance de sólidos y cobre fino, con los cuales se confecciona el balance de agua de las plantas concentradoras. Por esta razón se incluyen los resultados de la recuperación en peso para la etapa *Rougher* y de la flotación global para ambas plantas concentradoras.

4.2.1. BALANCE DE SÓLIDOS LAGUNA SECA LÍNEA 1

A continuación se expone la Figura 17, se observa que luego de reconciliar el balance de sólidos la tendencia de la recuperación en peso es a la baja, donde el poderado mensual para el valor medido es de 14,59%, mientras que posterior al ajuste alcanza un 14,08%, verificándose que durante el periodo de estudio, el ajuste porcentual ponderado mensual representa un 5,85%. Cabe mencionar que dicho ajuste porcentual se ve distorsionado por los días donde se registran mediciones de recuperaciones en peso por sobre el 15%, evidenciando la sensibilidad del ajuste de sólidos a las variaciones en las mediciones por análisis químico.

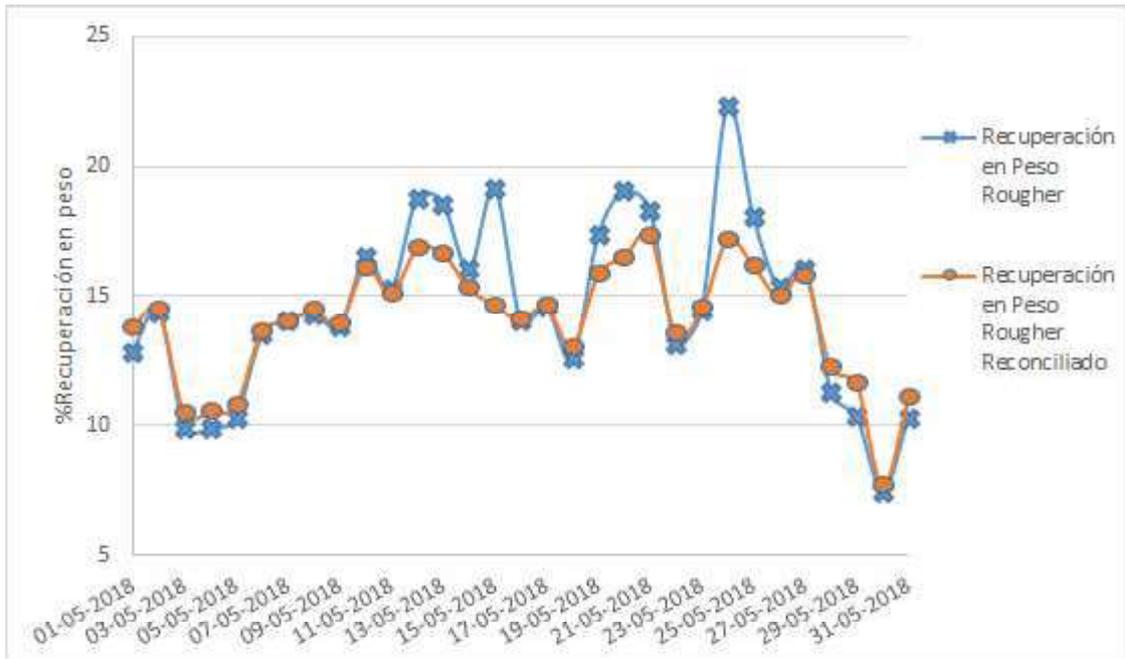


Figura 17: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Rougher, Laguna Seca Línea 1.

Siguiendo con el análisis sobre el balance de sólidos de Laguna Seca Línea 1, la Figura 18 muestra la reconciliación sobre la recuperación en peso global, evidenciándose una importante disminución de la diferencia entre los valores medidos y reconciliados respecto a la Figura 17.

Los resultados indican que el valor ponderado mensual para la recuperación en peso global medida es de 2,86% y luego del ajuste alcanza un 2,87%, representando un ajuste porcentual del 0,87% sobre el ponderado mensual del balance de sólidos global.



Figura 18: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Global, Laguna Seca Línea 1.

El resumen de la información se presenta en la Figura 19, la que muestra la comparación entre el ajuste porcentual para la recuperación en peso *Rougher* y Global, haciéndose notoria la mayor variación para la reconciliación del nodo de la flotación *Rougher*, lo que se relaciona en este a los valores puntuales para recuperaciones en peso con valores por sobre el 15%.

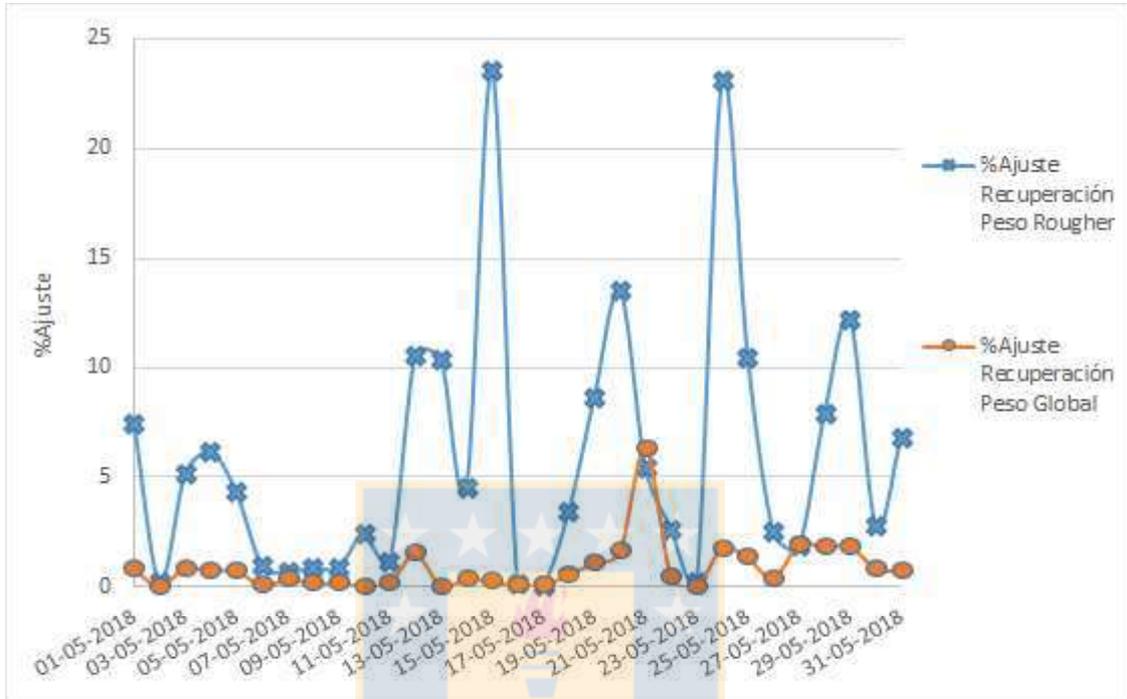


Figura 19: Ajuste porcentual sobre recuperación en peso *Rougher* y Global para Laguna Seca Línea 1.

4.2.2. BALANCE DE SÓLIDOS LAGUNA SECA LÍNEA 2

La Figura 20 muestra los resultados de la reconciliación sobre la recuperación en peso para la flotación *Rougher* de Laguna Seca Línea 2, donde el ponderado mensual medido alcanza un 10,16% de recuperación en peso, mientras que luego de la reconciliación el ponderado mensual aumenta a 10,34%. Se evidencia una mayor variabilidad en la performance metalúrgica durante el periodo estudiado en comparación a la Línea 1, aumentando significativamente el ajuste porcentual a 9,60% para el valor ponderado mensual.

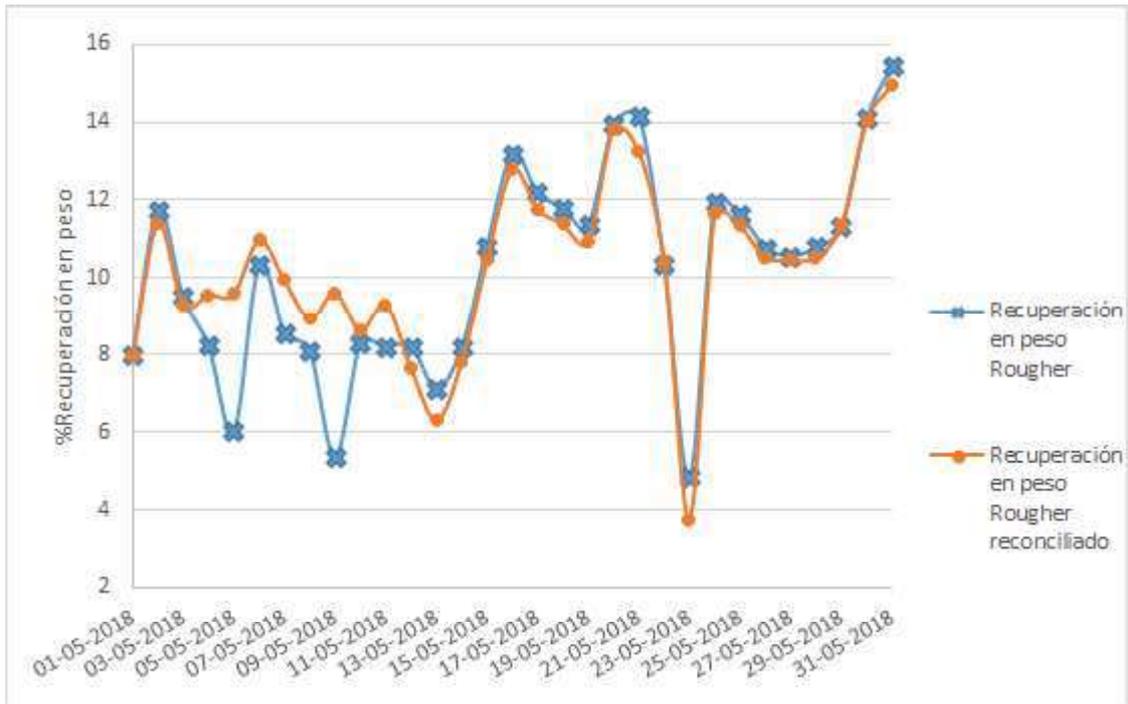


Figura 20: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Rougher, Laguna Seca Línea 2.

El resultado presentado en la Figura 21 evidencia que el valor ponderado mensual para recuperación en peso global alcanza el 2,52% y luego de la reconciliación este valor aumenta hasta un 2,58%. Esta variación representa a lo largo del mes una diferencia ponderada del 3,33% para el balance nodal de la etapa de flotación.



Figura 21: Resultado de balance y reconciliación de recuperación en peso para flotación Global, Laguna Seca Línea 2.

Para finalizar con este análisis se adjunta la Figura 22, la cual muestra el ajuste porcentual sobre la recuperación en peso *Rougher* y global. Es evidente que para el caso de la recuperación *Rougher*, la reconciliación resiente fuertemente la alta variabilidad de los datos y la baja recuperación entre el 08-05-2018 y el 14-05-2018, por lo que el ajuste porcentual es más sensible a variaciones y por consiguiente se observan valores puntuales alejados de la tendencia mostrada en el resto de los días.

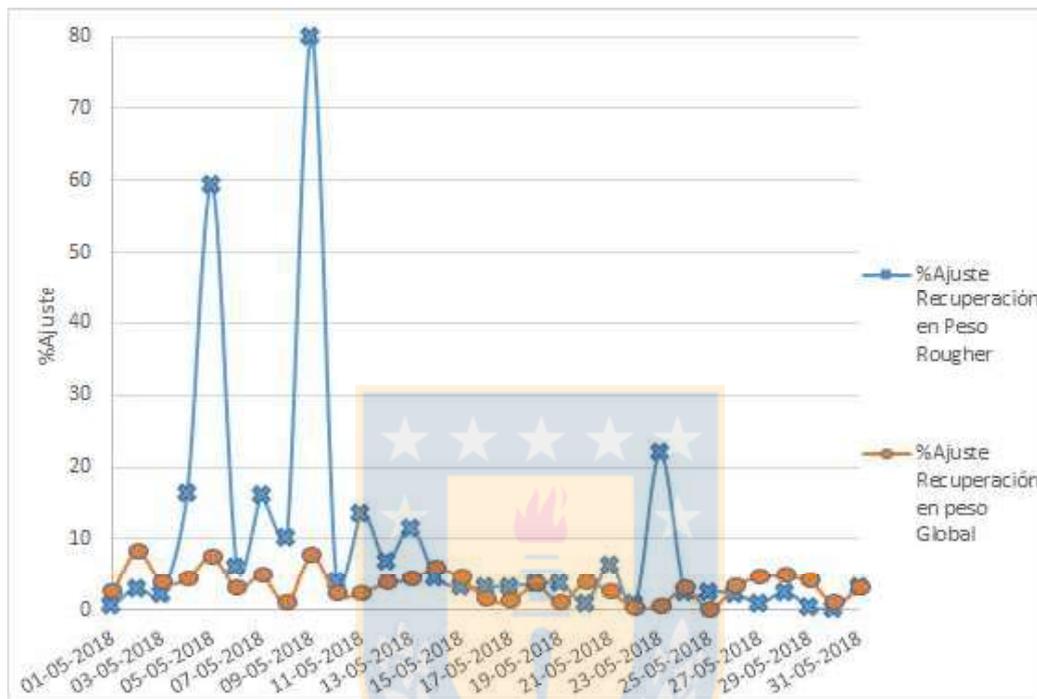


Figura 22: Ajuste porcentual sobre recuperación en peso *Rougher* y Global para Laguna Seca Línea 2.

4.3. BALANCE Y RECONCILIACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 1

Para el caso de la línea 1, la no existencia de flujómetros para medición de la pulpa de alimentación a las baterías de ciclones en la molienda secundaria impide el cálculo y ajuste de las corrientes por carga circulante.

Otra diferencia respecto al balance de la Línea 2, es que para el caso de la Línea 1, no se dispone de medición ni estimación de la cantidad de pulpa que alimenta a la etapa de flotación *Rougher*, por lo que el ajuste de sólidos en todo el sistema depende únicamente de los pesómetros de alimentación de mineral fresco al SAG 4 y los pesómetros de *Pebbles*.

Lo descrito en el párrafo anterior empeora al intentar determinar el balance metalúrgico para la etapa de flotación, debido principalmente al déficit de instrumentación de muestreo y análisis químico que restringen la determinación completa de los nodos de la flotación, tanto así que para determinar el balance de la flotación *Rougher* se recurre a la información puntual del composito químico para las colas *Rougher* y se utilizar el valor de distribución de corrientes según diseño para la estimación de las colas *Scavenger*.

A esto, se suma la adición de flujos de agua no determinados de dilución a la alimentación *Rougher*, de dilución en Remolienda y agua de lavado en la flotación columnar.

La falta de redundancia en la información disponible y la baja calidad de los datos obtenidos para el cierre del balance provocan un abrupto ajuste sobre la cantidad de agua medida por flujómetros, principalmente a causa de los bajos porcentajes de sólidos registrados tanto en las colas *Rougher* como en las colas finales. Lo que se evidencia al observar la Figura 23, donde el orden de la diferencia entre el valor de agua de procesos a la etapa de flotación medido respecto al valor reconciliado según los porcentajes de sólidos registrados alcanza los 1.836.244 m³ durante los 31 días de estudio, lo que equivale al 17,44% del volumen total del agua suministrada a la Línea 1 durante dicho periodo y representa una razón de agua respecto al mineral tratado de $0,43 \frac{m^3}{t}$.

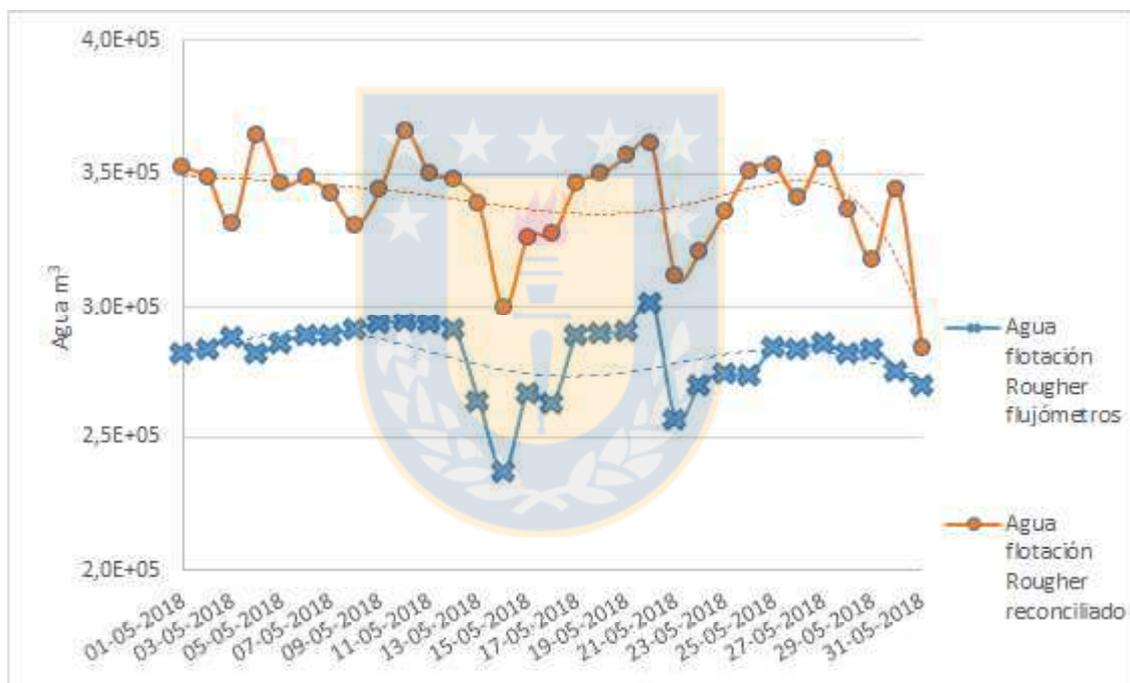


Figura 23: Comparación de resultados de balance de agua según agua medida por flujómetros respecto a la reconciliación de agua reportada en la flotación *Rougher*.

Al analizar detenidamente la información utilizada para el balance de agua, se tiene que la diferencia entre el porcentaje de sólidos medido por las sondas de análisis químico versus el porcentaje de sólidos calculado a partir de las mediciones de agua de suministro alcanza valores por sobre los cinco puntos porcentuales.

Esta importante discrepancia entre la información calculada respecto las mediciones de porcentaje de sólido para la alimentación *Rougher* se reflejan en los resultados de la reconciliación presentados en la Figura 24, donde el porcentaje de sólidos reconciliado se ajusta al porcentaje de sólidos medido para la corriente de alimentación *Rougher* por las sondas de análisis químico.

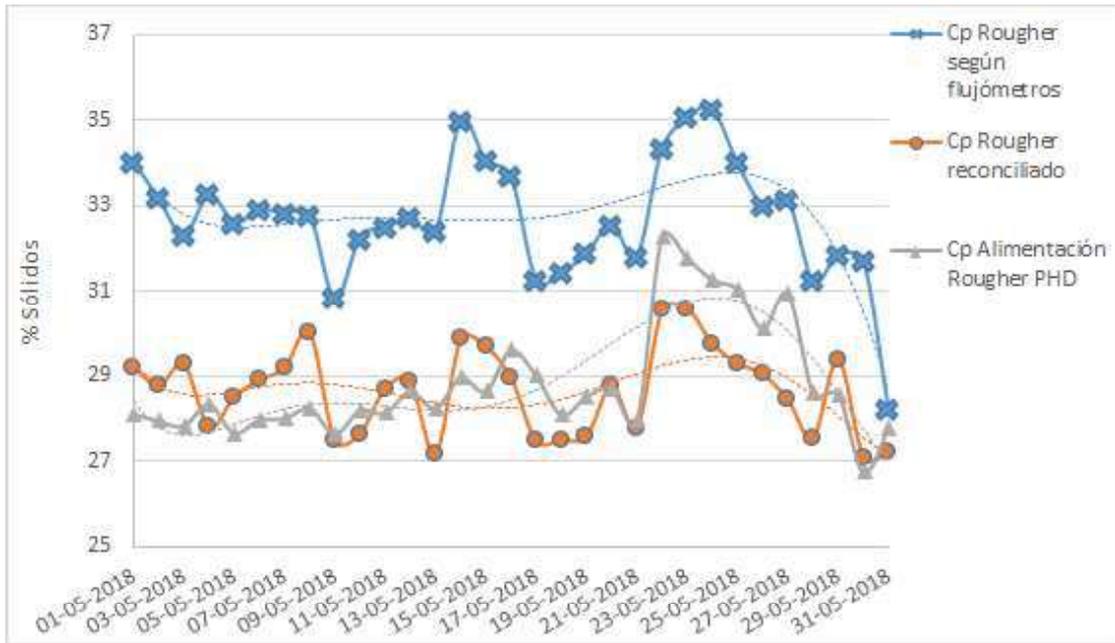


Figura 24: Comparación de porcentaje de sólido para corriente de agua en alimentación Rougher según balance por flujómetros, información de sondas de análisis químico y balance de agua reconciliado.

La Figura 24 muestra que para los días entre el 22-05 y 28-05 el porcentaje de sólidos reconciliado es menor al valor del porcentaje de sólidos según PHD y según cálculo por flujómetros, lo que se puede explicar en parte por el bajo porcentaje de sólidos reportado por las colas *Rougher* y colas finales durante esos días.

El resultado del porcentaje de ajuste para la corriente de agua en la flotación *Rougher* se resume a continuación en la Figura 25, donde se verifica un ajuste del agua del 21,13% sobre el valor totalizado mensual, mientras que el ajuste del porcentaje de sólidos ponderado mensual alcanza un 12,41%.

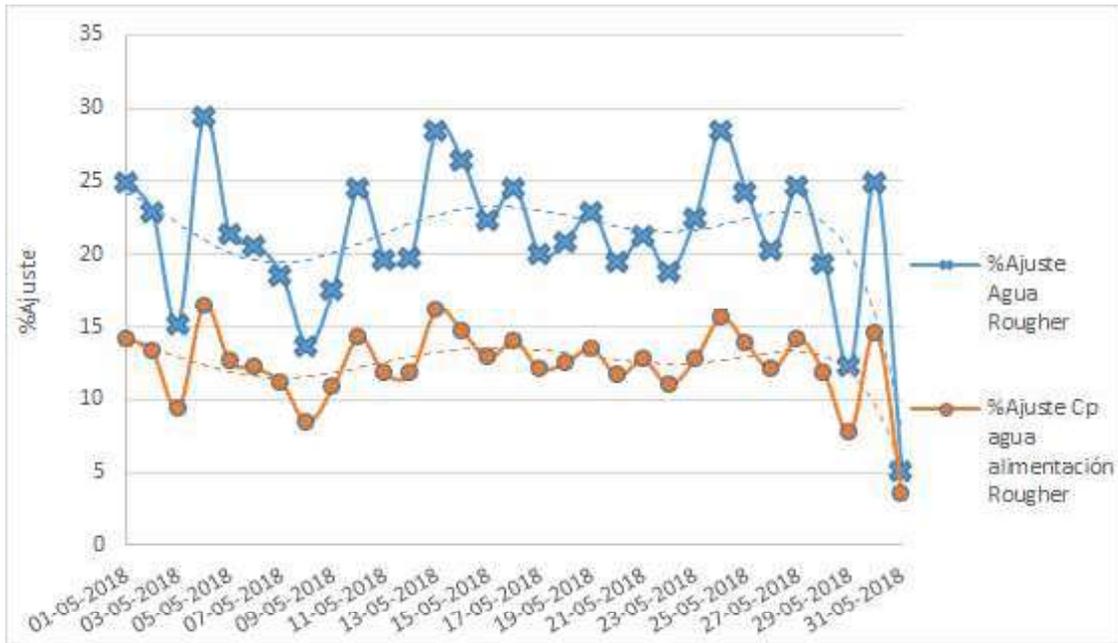


Figura 25: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en alimentación flotación Rougher Línea 1.

Como fue dicho anteriormente, los resultados de la reconciliación sobre el agua cuantificada como ingreso a la etapa de flotación se ven fuertemente influenciados por la calidad de la información disponible, y por los bajos porcentajes de sólidos registrados para las corrientes de colas *Rougher*, colas *Scavenger* y colas finales.

Al comparar el resultado del balance de agua para la Línea 1, se observa que las mayores diferencias en la reconciliación se presentan en el nodo de alimentación a la flotación *Rougher*, esto se debe principalmente a tres factores, los que son:

- 1) Las diferencias entre el modelamiento de las mallas de balance entre ambas plantas concentradoras, donde para el caso de la Línea 1 se contrasta la información de pesómetros y flujómetros directamente con el balance metalúrgico proveniente de sondas de análisis químico en línea e información de compósitos químicos.
- 2) Se incluye adición de agua no medida en la alimentación *Rougher*, lo que es necesario para alcanzar los bajos valores medidos para el porcentaje de sólidos en la corriente de concentrado *Rougher* y en las colas *Rougher*.
- 3) Las importantes diferencias de medición que se presentan en la Figura 23 para el porcentaje de sólidos en la pulpa que alimenta a la flotación *Rougher*.

Un análisis sobre los resultados del balance y reconciliación sobre la corriente de colas *Rougher* expuesto en las Figuras 26 y 27 muestra que para esta corriente se tiene registro de bajos porcentajes de sólidos sumado a una alta variabilidad en el volumen de agua calculado para la corriente y consecuentemente una adición sobredimensionada de agua para el tamaño de la corriente.

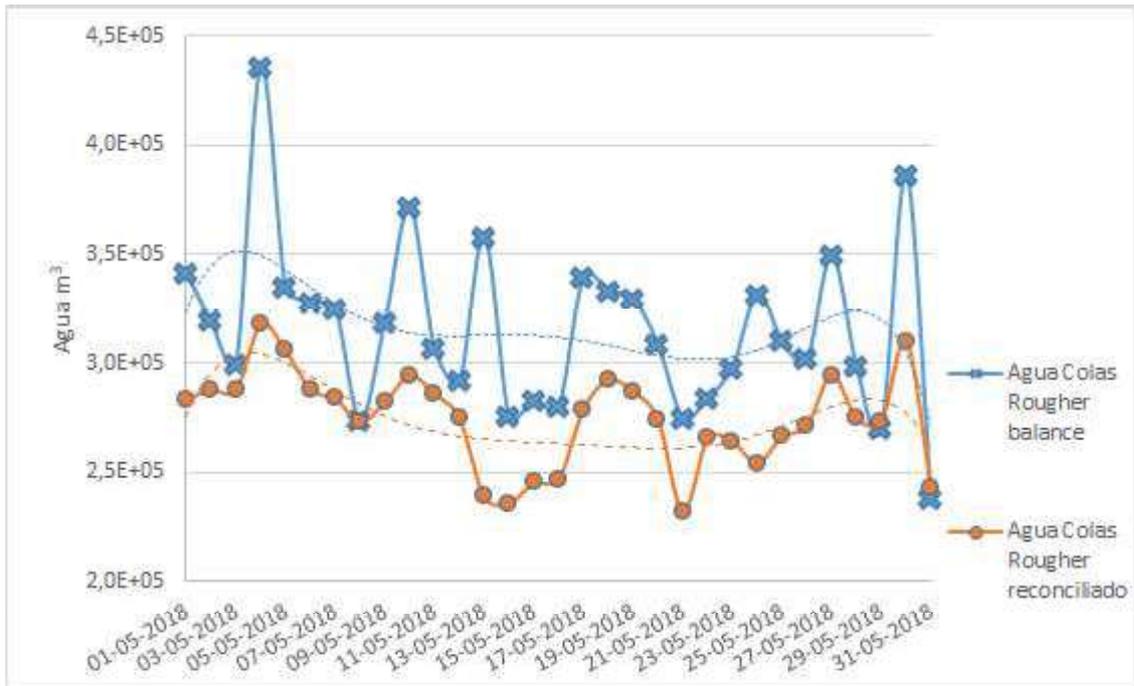


Figura 26: Resultados de balance y reconciliación de agua para corriente de colas Rougher, Línea 1.

Al observar la Figura 26, es notoria la disminución del volumen de agua para los valores reconciliado así como la estabilización de las mediciones en torno a los 250.000 y 300.000 m³. Además se obtiene como resultado que la magnitud de la disminución para el volumen de agua en las colas *Rougher* según balance metalúrgico en comparación al valor reconciliado alcanza 1.295.216 m³ durante el periodo de estudio, siendo estos resultados más coherentes a las dimensiones de la Línea 1, su capacidad de suministro de agua y su capacidad de tratamiento de mineral.



Figura 27: Resultados de balance y reconciliación de porcentaje de sólidos para corriente de colas Rougher, Línea 1.

Para el caso de los resultados expuestos en la Figura 27, se verifica que los valores medidos para el porcentaje de sólidos de las colas *Rougher* ponderadas durante el mes de estudio alcanzan el 27,61% de sólidos, mientras que reconciliación indica que las colas *Rougher* alcanzan un 29,93% de sólidos, valores que se encuentran alejados del 33,60% de sólido definido en los criterios de diseño definidos para esta corriente.

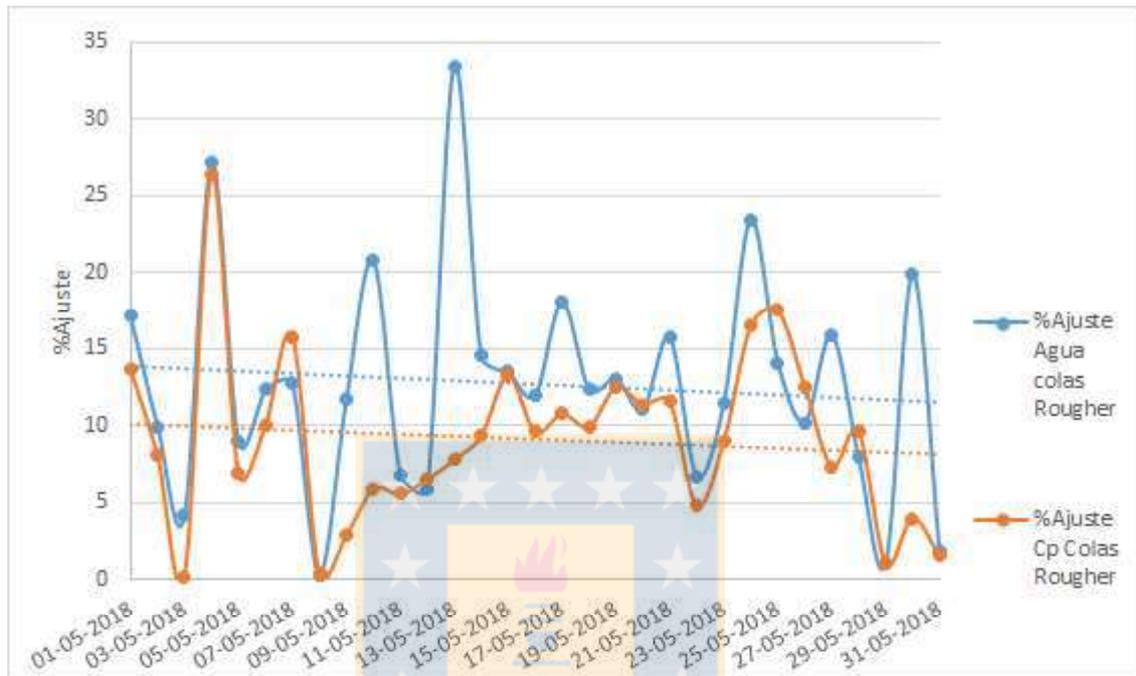


Figura 28: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en colas *Rougher* Línea 1.

La Figura 28 muestra el ajuste porcentual que sufre el agua en la corriente de colas *Rougher* y el porcentaje de sólidos luego de la reconciliación, para el caso del ajuste porcentual o tolerancia sobre el volumen de agua reportado en las colas *Rougher* representa una disminución del 12,71% sobre el valor totalizado mensual, mientras que la variación del porcentaje de sólidos representa un aumento del 8,27%.

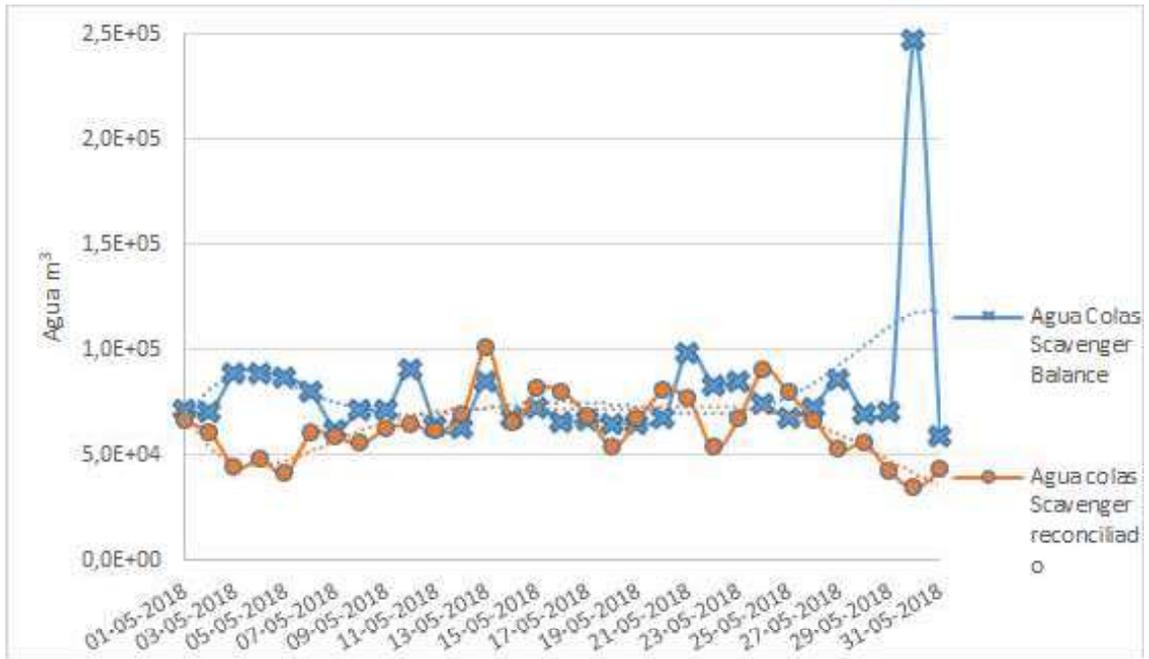


Figura 29: Resultados balance y reconciliación para corriente de colas Scavenger, Línea 1.

Siguiendo con el mismo análisis para las colas Scavenger, se extrae desde la Figura 29 que la reconciliación disminuye la cantidad de agua cuantificada en esta corriente, consecuentemente a estos resultados se tiene un aumento del porcentaje de sólidos, resultado presentado en la Figura 30.



Figura 30: Resultados balance y reconciliación de porcentaje de sólidos para corriente colas Scavenger, Línea 1.

A continuación en la Figura 31 se presentan los resultados de la reconciliación del balance sobre la corriente de colas finales, observándose una disminución del volumen de agua reportado en la corriente que alimenta a la etapa de espesamiento de Relaves.

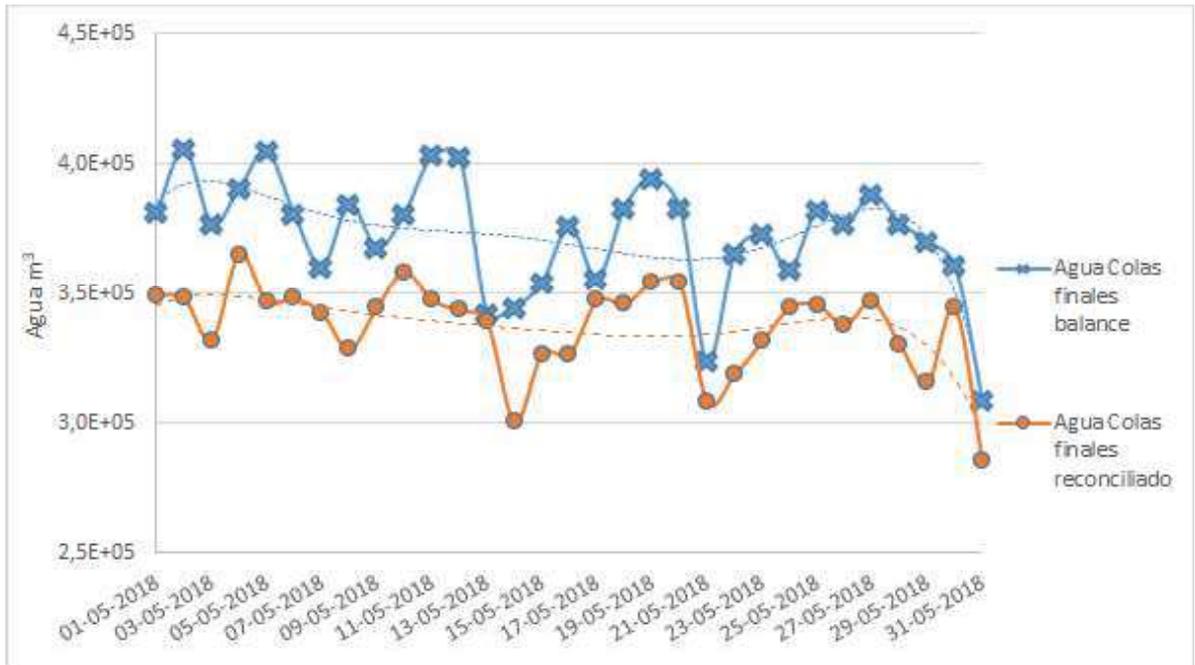


Figura 31: Resultados de balance y reconciliación para volumen de agua en corriente de colas finales, Línea 1.

Los resultados observados en la figura anterior indican que el agua presente en la corriente de relave final disminuye $1.107.745 \text{ m}^3$ durante el periodo de muestreo, disminución que representa un 9,58% del volumen total contabilizado en el mes para la corriente de relave final, coherentemente con los resultados obtenidos para las colas *Rougher* y colas *Scavenger*.

Llama la atención que la magnitud de la reconciliación para el volumen de agua en la corriente de colas *Rougher* es mayor que el ajuste sobre el volumen de agua en las colas finales, esto principalmente por la mala calidad de la información disponible y la falta de redundancia para el cierre del nodo.

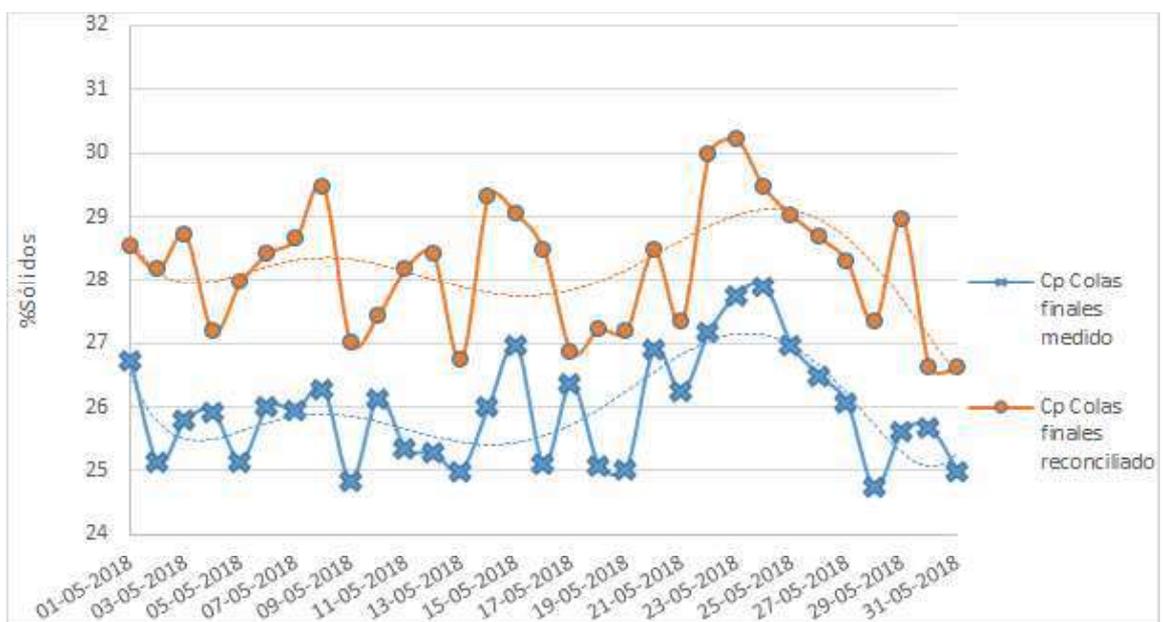


Figura 32: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólidos para corriente de colas finales, Línea 1.

Los resultados expuestos en la Figura 32 indican un aumento desde 25,96% de sólidos hacía un 28,19% de sólidos, lo que representa un aumento de 2,23 puntos porcentuales sobre el valor ponderado mensual del porcentaje de sólidos en la corriente de colas finales.

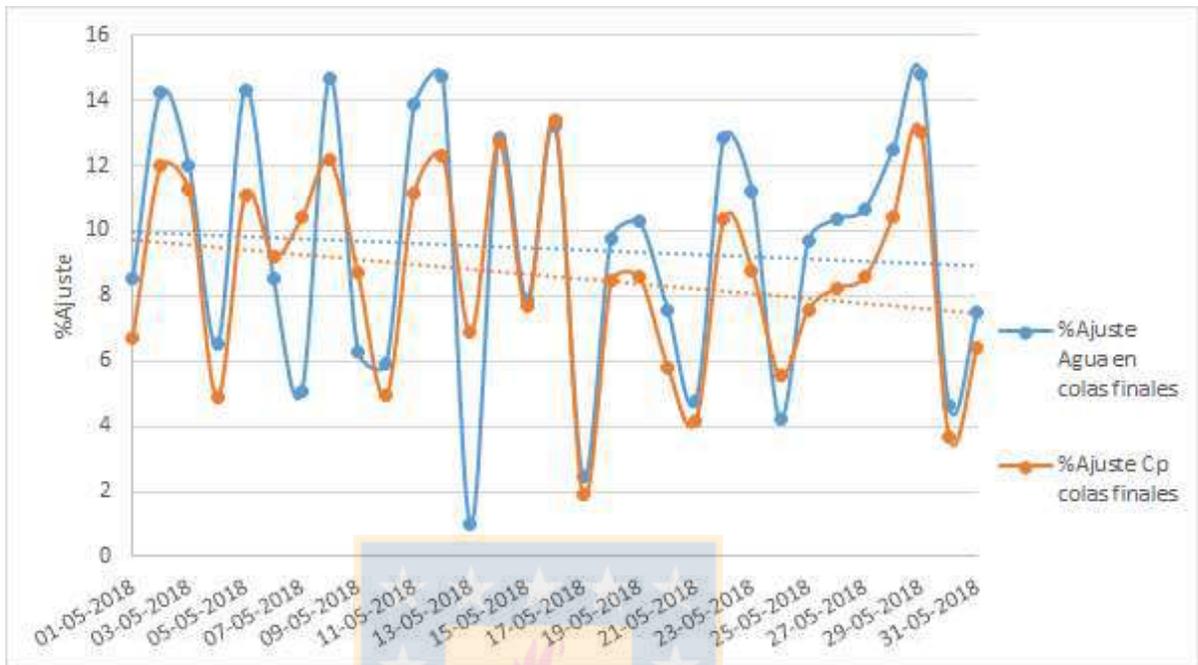


Figura 33: Porcentaje de ajuste para agua y porcentaje de sólido en colas finales Línea 1.

Al cuantificar el porcentaje de ajuste o tolerancia sobre el agua en las colas finales en la Figura 33, se tiene que para el volumen de agua en las colas finales, la reconciliación sobre el balance metalúrgico ajusta un 9,45% el volumen de agua total mensual, mientras que el porcentaje de sólidos se ajusta un 8,62%.

Al comparar los resultados del balance no reconciliado para la corriente de relave final con los valores de agua medidos que alimentan a los espesadores de relaves presentados en la Figura 34, se observa una importante diferencia entre las aguas reportadas en las colas respecto con el agua medida por los flujómetros que cuantifican la alimentación de pulpa a los espesadores de relaves TK-006, TK-007 y TK-008.

El modelo de reconciliación busca satisfacer la ley de conservación de la masa para la condición de un balance estacionario, por lo tanto para cumplir dicha condición se ajustan tanto las corrientes que representan al relave según balance metalúrgico como las mediciones de agua en la pulpa hacia los espesadores de relaves. Donde la magnitud del ajuste será proporcionalidad a la confiabilidad de los datos, mediante el cálculo del error de cada una de las corrientes, de esta forma se observa en la figura 35 que la reconciliación para la corriente que representa al relave final se ajusta a los valores medidos por los flujómetros y densímetros dispuestos en las alimentaciones de los TK-006, TK-007 y TK-008.

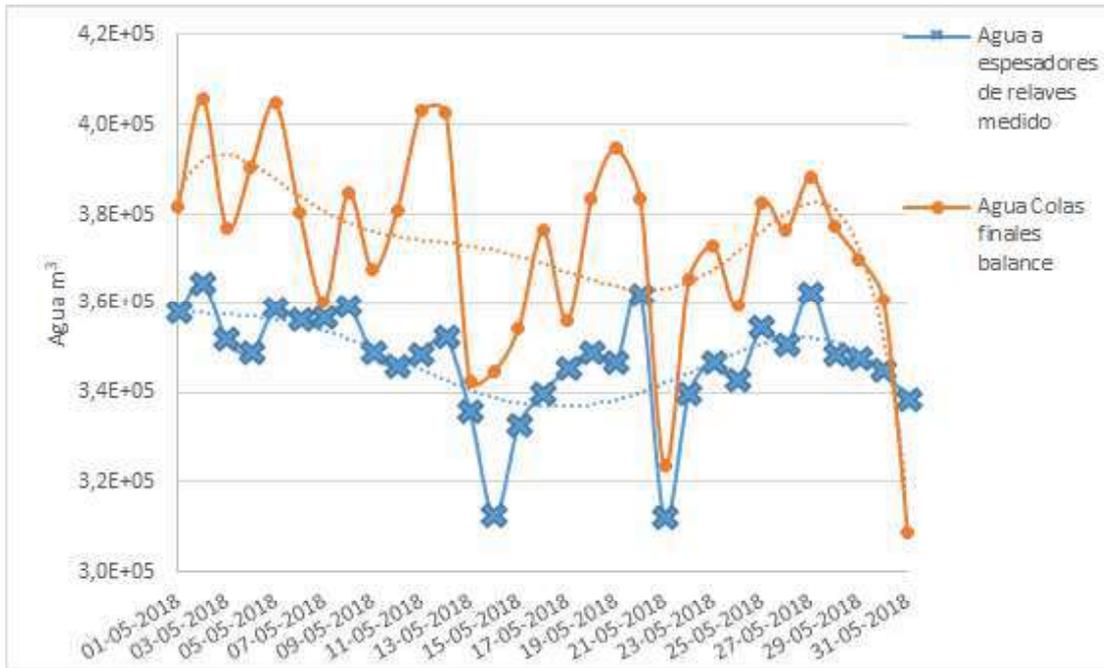


Figura 34: Diferencia de volumen de agua entre corriente de relave final no reconciliada respecto a medición de flujómetros de alimentación a espesadores de Relave, Línea 1.

Los resultados de la reconciliación para los flujos que alimentan a los espesadores de relaves en la Figura 35 evidencian una disminución del volumen de agua de 304.556 m³ durante el tiempo de estudio, lo que confirma la medición errónea del porcentaje de sólidos para las corrientes de colas Rougher. Además, se tiene que las mediciones entregadas por los flujómetros en la alimentación a los espesadores son coherentes en el orden de magnitud con el aumento en la corriente de agua que ingresa a la flotación, lo que demuestra una gran incertidumbre en la determinación del agua de procesos que ingresa al sistema.

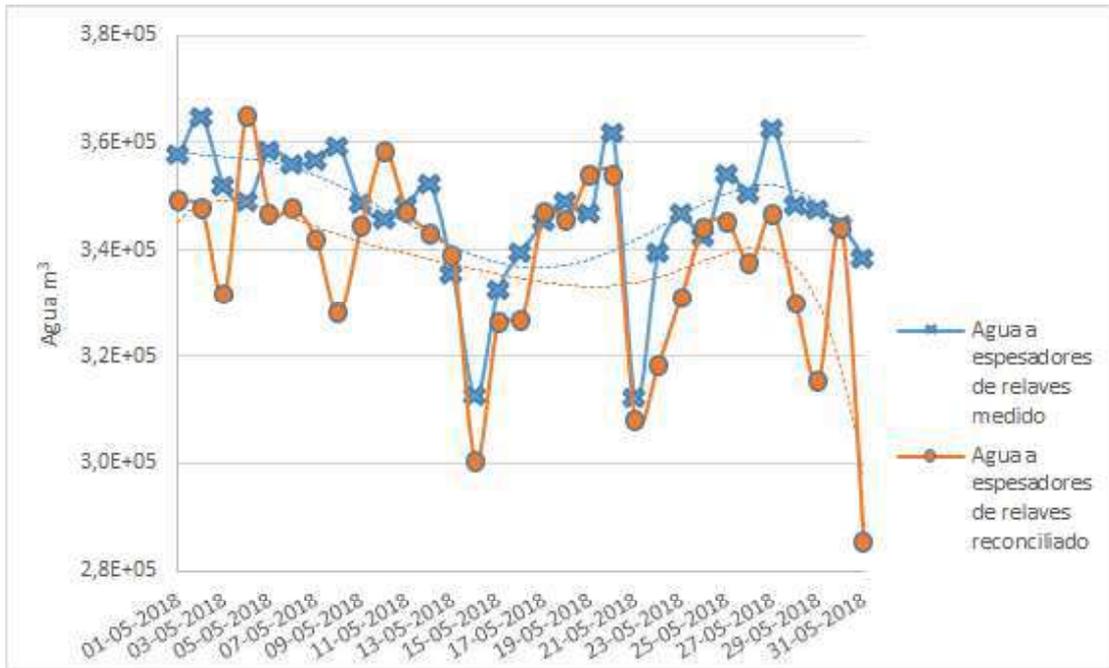


Figura 35: Resultados de balance y reconciliación sobre medición de agua hacia espesadores de relave, Línea 1.

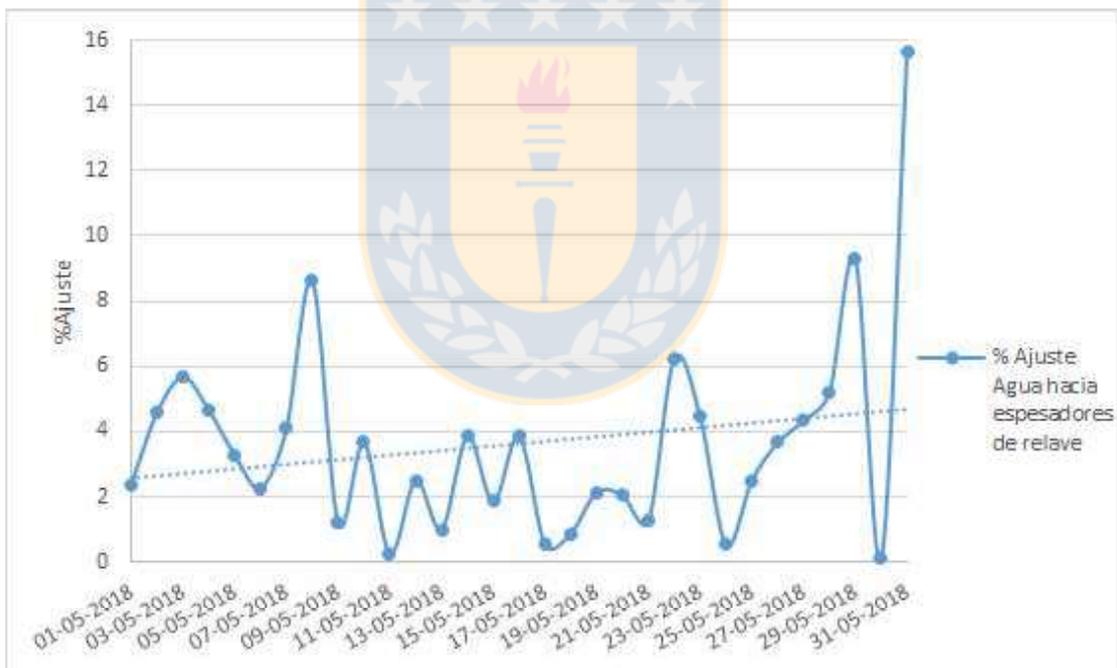


Figura 36: Porcentaje de ajuste para agua hacia espesadores de relave Línea 1.

La Figura 36 muestra el resultado de la reconciliación como ajuste porcentual sobre la medición de agua hacia los espesadores de relave. Es claro que el ajuste sobre esta corriente es menor al sufrido por las colas *Rougher* y finales, lo que es signo de mayor fiabilidad en la información de esta corriente y permite dimensionar la real magnitud del ingreso de agua al sistema.

A continuación se presentan los resultados del ajuste sobre los porcentajes de sólidos en la descarga del espesamiento de relaves, haciéndose evidente la baja influencia de la

reconciliación sobre las mediciones, debido principalmente al factor de linealización existente para el cálculo de inventario en el estanque espesador, a los extremadamente bajos porcentajes de sólidos alcanzados por la operación en la descarga de los espesadores y a la reconciliación sobre las mediciones de agua en la alimentación a los espesadores de relave.



Figura 37: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-006.

Los resultados expuestos en la Figura 37 muestran que durante 15 de los 31 días que componen el tiempo de muestreo, la operación del TK-006 arrojó mediciones por debajo del 50% de sólidos, lo que evidencia la poca eficiencia del espesamiento de relaves en la recuperación del agua de procesos.

Se observa además que la condición de operación de la descarga del TK-006 mejora para los días comprendidos entre el 22-05 al 31-05, alcanzando valores por sobre el 50% de sólidos y ajustándose a las indicaciones entregadas como parámetros de operación para la Línea 1 mostradas en la Tabla 2.

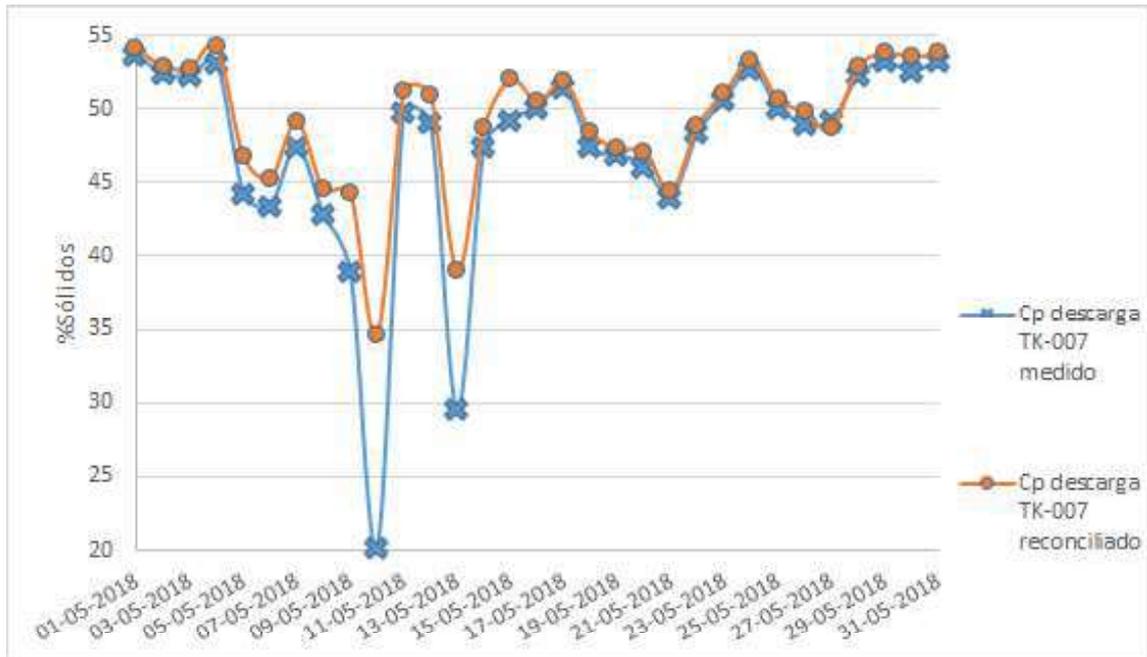


Figura 38: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-007.

Continuando con el análisis sobre el espesamiento de relaves, la realidad del estado de la descarga del TK-007 presentado en la Figura 38 no es muy distante de lo presentado en la Figura 31. Si bien, para el caso del TK-007 en la Figura 38, la descarga alcanza valores cercanos al 54,0%, se observa una mayor variabilidad en la operación del espesador que para el caso del TK-006, registrándose 20 de 31 días con mediciones por debajo del 50,0% de sólidos, valores muy distantes a los 52,5% de sólidos recomendados como parámetros de operación.

Los mejores resultados en la operación del espesamiento de relaves los presenta el TK-008 en la Figura 39, el que aun cuando presenta una alta variabilidad para la medición del porcentaje de sólidos en la descarga, alcanza valores por sobre el 50,0% de sólidos 22 de los 31 días del muestreo.



Figura 39: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólido en descarga de TK-008.

Los resultados expuestos en las Figuras 37, 38 y 39 muestran que los valor reconciliados para el porcentaje de sólidos en la descarga alcanzan los 48,09%, 47,87% y 50,14% de sólidos respectivamente para el TK-006 TK-007 y TK-008.

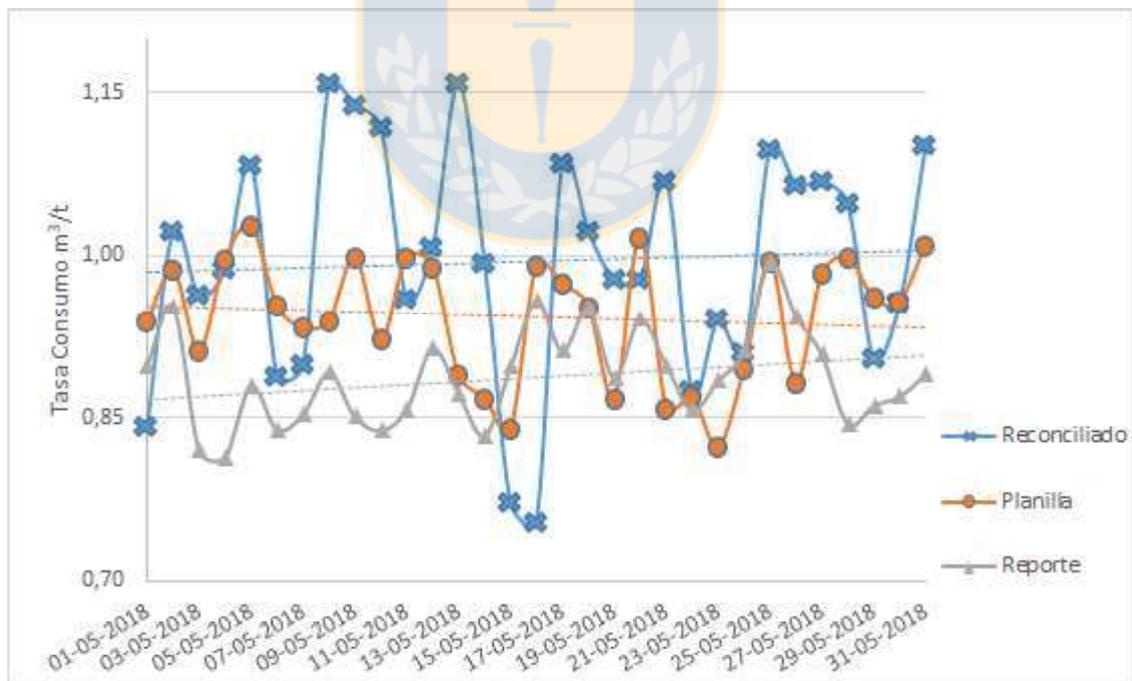


Figura 40: Comparación de Tasas de consumo de agua de procesos para la Línea 1 según planilla de instrumentación de agua de suministro, reporte de consumo de agua de NPI y reconciliación de agua recuperada.

Los negativos resultados mostrados en recuperación de agua por Laguna Seca Línea 1, son indicadores de altas tasas de consumo, los cuales a modo de comparación son expuestos en la Figura 40.

La información expuesta en la Figura 40 muestra importantes diferencias entre las tasas de consumo, esto debido principalmente a las diferencias en los métodos de cálculo de cada uno de los factores.

Para el caso del Reporte de NPI (Reporte), el promedio de las tasas de consumo para el muestreo alcanza $0,89 \frac{m^3}{t}$, valor de tasa de consumo que representa una diferencia de 447.331 m^3 mensuales.

Esto considerando que el cálculo de la tasa de consumo se hace sobre el agua fresca que ingresa al TK-083 y al agua recuperada desde el tranque, sin considerar los traspasos internos, los cuales modifican fuertemente el ingreso de agua de procesos desde Laguna Seca Línea 2 a Laguna Seca Línea 1, por lo que para el caso de la Línea 1, parte del consumo de agua se carga sobre el consumo de Laguna Seca Línea 2.

En el caso de la planilla según instrumentación (Planilla), el resultado de la tasa de consumos alcanza $0,94 \frac{m^3}{t}$, valor que representa una diferencia de 212.637 m^3 respecto al valor de las tasas de consumo reconciliadas, donde el método utilizado para el cálculo de la tasa de consumo considera la información de flujómetros para agua de suministro y recuperada de la concentradora, contabilizando estimaciones de los niveles de piscinas y estanque con agua recirculada, además de la cuantificación parcial de los traspasos internos, mostrando mayor certeza que el reporte sobre el real estado de consumo de la Línea 1.

Mientras que para el caso de las tasas de consumo reconciliadas el valor de la tasa de consumos alcanza $1,00 \frac{m^3}{t}$, estos valores muestran los requerimientos de reposición de agua para la planta concentradora, considerando la cuantificación de agua que es enviada al tranque de relaves, por lo que se ajustan a los consumos reales de los procesos unitarios. Esto significa que se cuantifica directamente como consumo de agua por parte de la Línea 1 y se interpreta como un parámetro directo de verificación sobre la performance del consumo de agua en el procesamiento de minerales de Laguna Seca Línea 1.

El aumento en la tasa de consumo reconciliado significa una importante diferencia en la cuantificación del agua de procesos para Laguna Seca Línea 1, lo que se presenta a continuación en la Figura 41.

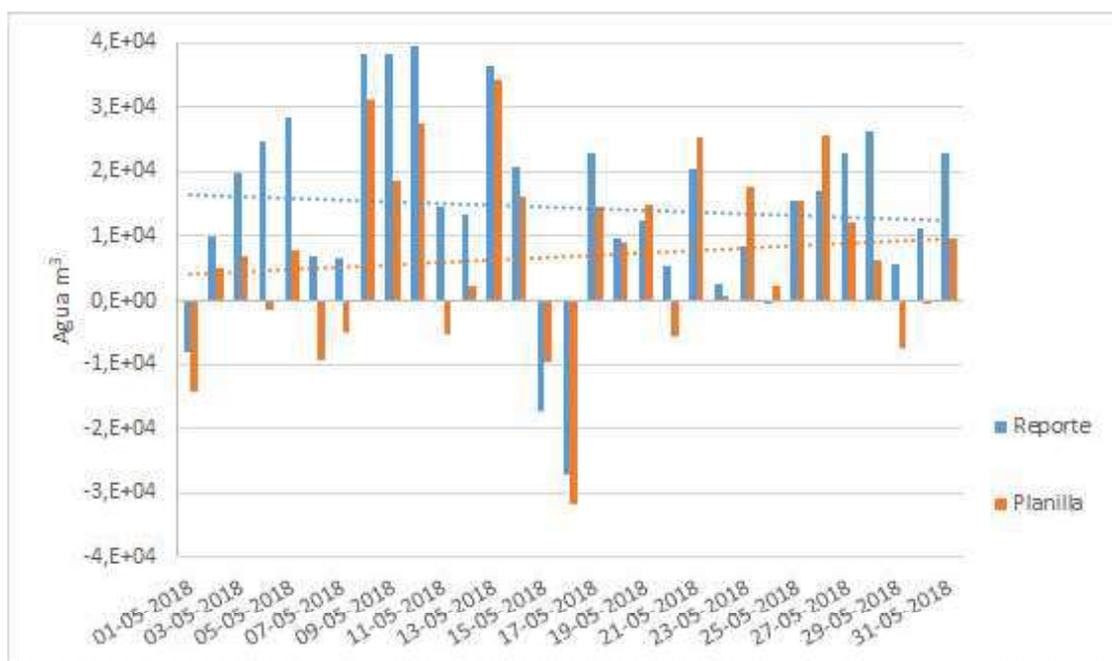


Figura 41: Diferencia en volumen de agua de procesos que significa la reconciliación de la tasa de consumo para Laguna Seca Línea 1 según resultados del reporte NPI y planilla de cálculo según instrumentación.

El Resultado del balance reconciliado se resume en la plataforma expuesta en las Figuras 89, 90 y 91 adjuntas en anexos, donde de manera intuitiva e interactiva se entrega la información de la performance del consumo de agua de ambas planta durante el día. Lo destacable de la reconciliación del balance de agua, es que la data obtenida a través de PHD se complementa con información ingresada por el usuario, la que preferentemente corresponde al resultado de los compósitos químicos o en su defecto resultados de muestreos especiales.

4.4. BALANCE Y RECONCILIACIÓN LAGUNA SECA LÍNEA 2

Para el caso del balance de agua y reconciliación mediante multiplicadores de Lagrange para Laguna Seca Línea 2 se tienen ciertas diferencias en el diseño de la etapa de flotación y una mayor disponibilidad de mediciones.

Una de las principales diferencias entre el sistema de ecuaciones a determinar para la Línea 2 de la Línea 1 se encuentra en la alimentación a la flotación *Rougher*, donde para la Línea 2 se tiene una estimación de caudal en la canaleta de alimentación al cajón de distribución a las cabeceras de las filas de flotación *Rougher*, esto permite una reconciliación entre el volumen de agua de procesos medido por flujómetros respecto a la estimación de volumen de agua en pulpa.

A diferencia del muestreo en la alimentación *Rougher* para la Línea 1, el caso de la Línea 2 presentado en la Figura 42 evidencia una mejor representatividad del corte de muestras para la comparación entre el porcentaje de sólidos calculado a partir desde la cantidad de agua cuantificada por flujómetros respecto la medición del porcentaje de sólidos por la sonda de

análisis químico en el punto , mostrando diferencias puntuales para los días donde se registró detenciones temporales en el SAG 5 y como resultado de esto, consumo de agua relacionada a la detención de los equipos y una disminución en el tratamiento diario durante esos días.



Figura 42: Comparación de resultados de balance de agua según agua medida por flujómetros respecto a la reconciliación de agua reportada en la flotación Rougher Línea 2.

La Figura 42 muestra que dada la mayor representatividad en el muestreo y la mejor calidad de los datos disponibles, el porcentaje de sólidos para la alimentación *Rougher* se ajusta hacia los valores calculados a partir de la información recogida por los flujómetros, los resultados del balance muestran que el porcentaje de sólidos según estimación de agua en la canaleta de alimentación *Rougher* el valor ponderado mensual es de 26,17% de sólidos, 27,08% sólidos según cálculo a partir de la información entregada por flujómetros, mientras que el valor luego de la reconciliación alcanza el valor de 26,36% de sólidos ponderado mensual. Esto se traduce en que el ajuste sobre el volumen de agua para la alimentación *Rougher* es de menor magnitud que para la Línea 1, resultado que se presenta a continuación en la Figura 43.

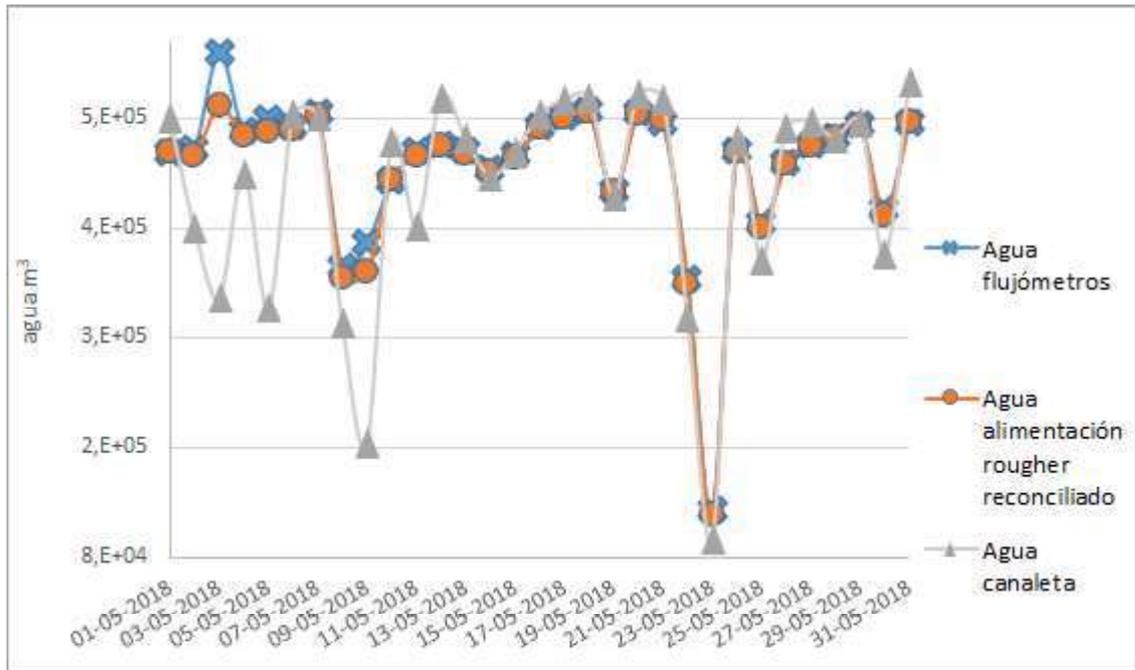


Figura 43: Resultado de balance y reconciliación en corriente de agua alimentación a flotación Rougher, Línea 2.

La reconciliación sobre el volumen de agua de procesos medida por los flujómetros arroja una disminución sobre el agua cuantificada de 120.554 m³ durante el mes de estudio, valor que representa una diferencia del 0,89% del total acumulado mensual y una razón de suministro de $0,025 \frac{m^3}{t}$, resultado atribuible en gran medida al error de medición inherente al instrumento de medición y al error grueso causado por incrustación de las líneas de agua.

Mientras que el mismo ajuste sobre la estimación de agua en la canaleta hacia la flotación Rougher representa un aumento de 491.881 m³ durante el mismo periodo, representando un ajuste porcentual del 3,82% sobre el volumen de agua totalizado mensual.

Estos resultados se muestran a continuación en la Figura 44, los que muestran marcadas diferencias puntuales para el ajuste sobre la estimación de agua en la canaleta, valores que distorsionan la comprensión del ajuste y que son provocados por las diferencias entre el porcentaje de sólidos calculado a partir de las mediciones de los flujómetros respecto al porcentaje de sólidos medido por análisis químico.

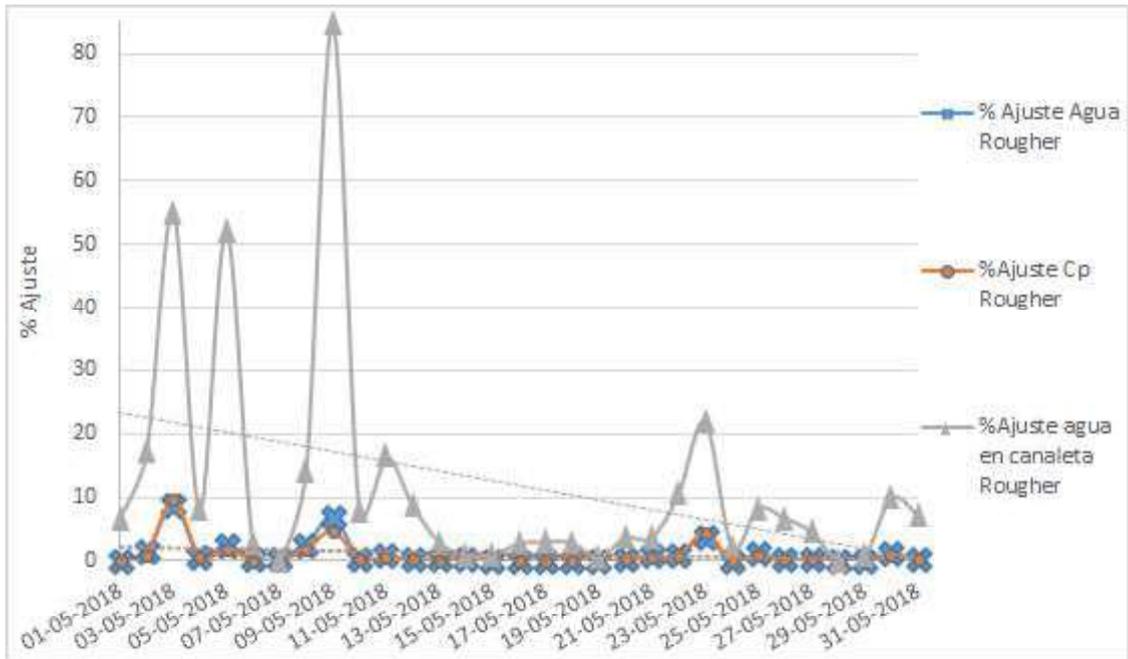


Figura 44: Porcentaje de ajuste sobre volumen de agua y porcentaje de sólidos en corriente de alimentación Rougher Línea 2.

Siguiendo con el análisis de las principales corrientes que determinan el balance y reconciliación de agua en el sistema, se presentan en la Figura 45 los resultados para el agua en las colas *Rougher*.

Se registra un aumento de 898.055 m³ de agua en las colas *Rougher*, donde el mayor ajuste se produce durante los primeros 9 días que componen la población de la muestra para luego suavizar tendencialmente el ajuste a los valores obtenidos mediante balance metalúrgico, ajuste que representa un 8,80% de ajuste sobre el volumen de agua totalizado en el periodo.

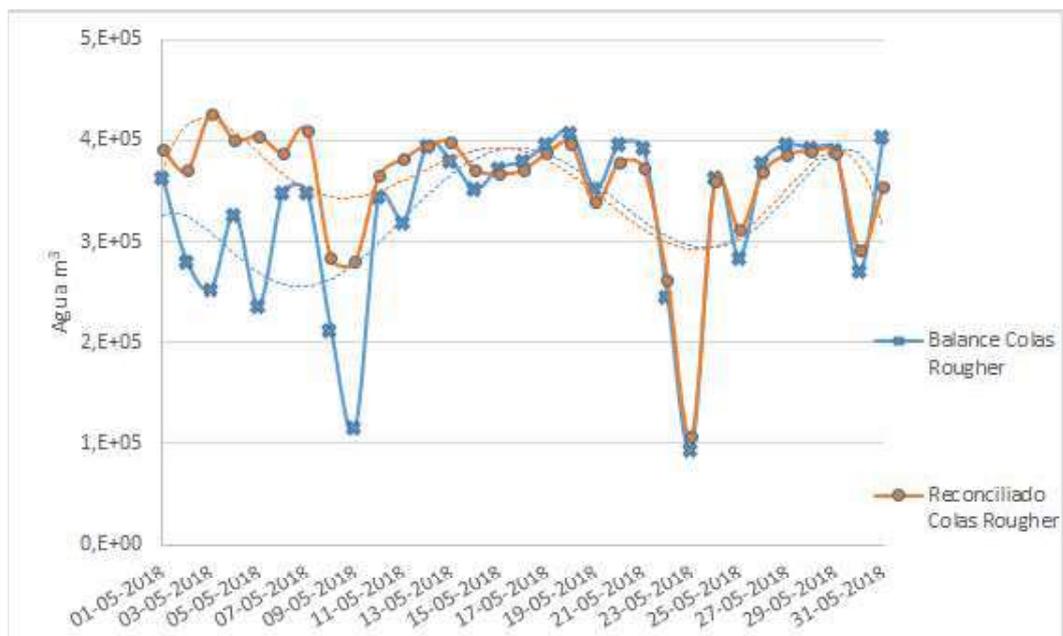


Figura 45: Resultado de balance y reconciliación sobre corriente de agua en las colas *Rougher* Línea 2.

Las variaciones del volumen de agua en la corriente de colas *Rougher* significa la reconciliación sobre el porcentaje de sólidos presentada en la Figura 46, donde el aumento en el volumen de agua registrada en las colas *Rougher* significa pasar desde 28,65% de sólidos a un 27,60% de sólidos, lo que representa una variación porcentual del 4,38% sobre el valor totalizado mensual.

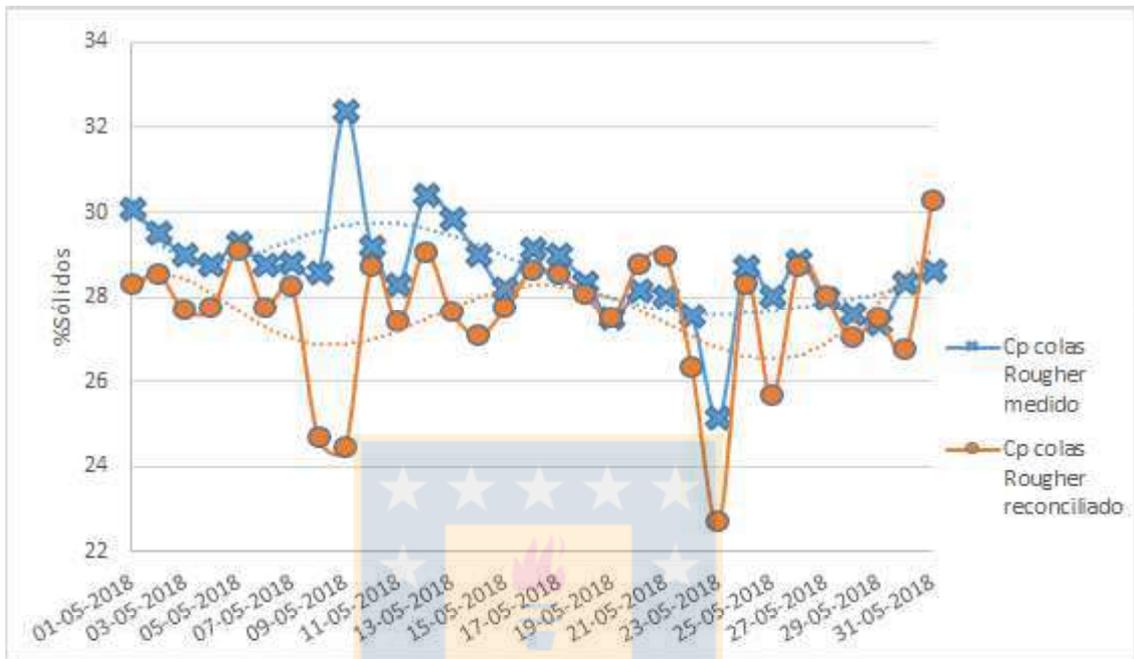


Figura 46: Resultado de balance y reconciliación sobre porcentaje de sólidos para colas *Rougher* Línea 2.

El resultado del ajuste porcentual sobre el volumen de agua y porcentaje de sólidos registrados en las colas *Rougher* se presenta a continuación en la Figura 47, de la cual se desprende que tal como se dijo, las mayores variaciones en la reconciliación se tienen durante la primera semana para posteriormente disminuir durante el transcurso del mes.

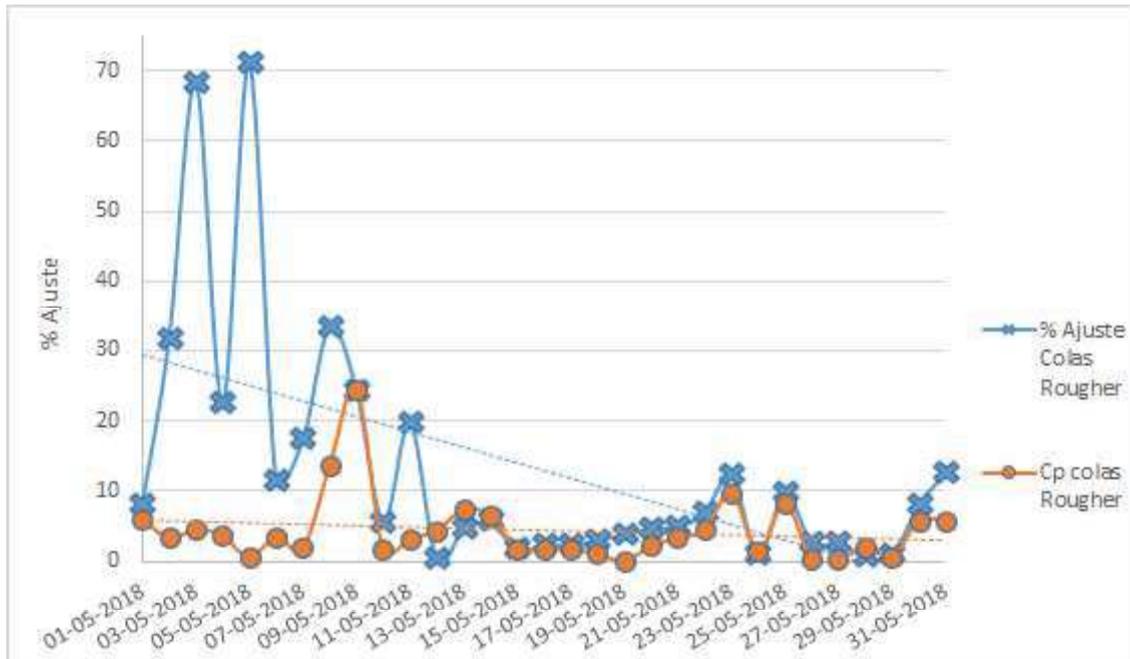


Figura 47: Porcentaje de ajuste sobre volumen de agua y porcentaje de sólidos en colas Rougher Línea 2.

Si se analizan los resultados de la Figura 47, se puede observar que la mayor variación se produce durante los primeros nueve días del periodo muestreado, esto ocurre básicamente por dos fenómenos que ocurren durante ese intervalo, el primero es una baja recuperación en peso para la flotación *Rougher*, lo que implica que una proporción mayor de la masa que ingresa a la concentradora se reporta en la corriente de las colas y el segundo fenómeno que afecta a los días 08-05 y 09-05 es una menor utilización de la planta, lo que se traduce en un menor tratamiento relacionado a un alto consumo de agua.

El análisis del balance y reconciliación sobre el volumen de agua en las colas finales presentado en la Figura 48 muestra una disminución de 455.391 m³ durante el periodo de muestreo, lo que equivale a una variación del 3,27% del totalizado mensual.

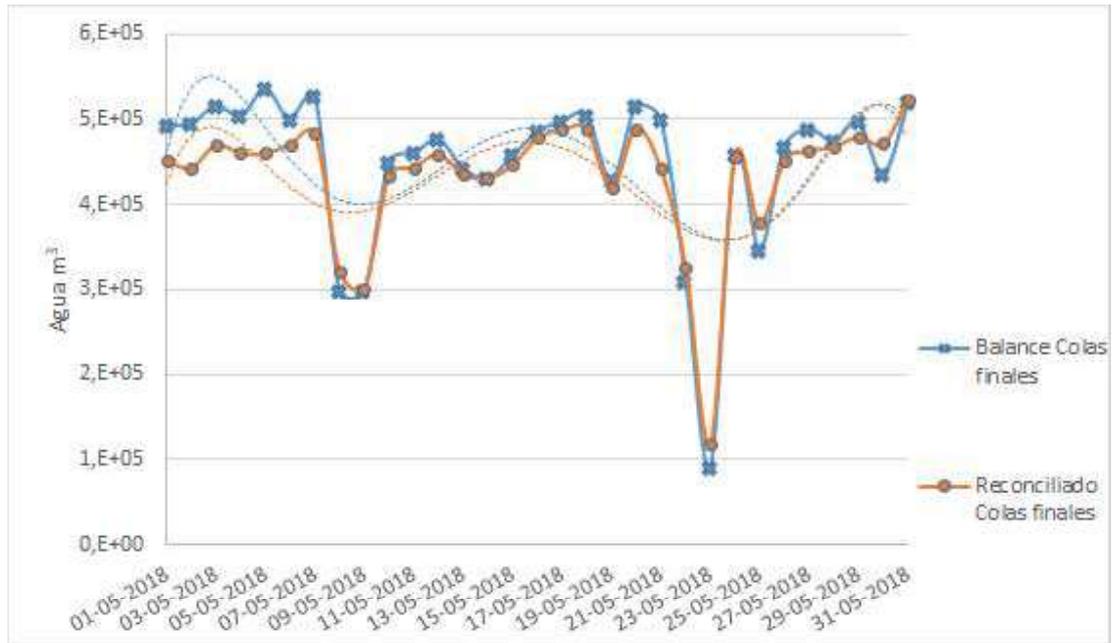


Figura 48: Resultado de ajuste y reconciliación para volumen de agua en colas finales Línea 2.

Los resultados expuestos en la Figura 48 significan un leve aumento sobre el porcentaje de sólidos registrado para la corriente, variación que se presenta en la Figura 49.



Figura 49: Resultado de ajuste y reconciliación para porcentaje de sólidos en colas finales Línea 2.

El porcentaje de sólidos ponderado para el periodo de estudio pasa de 25,07% a 25,53%, lo que representa una variación porcentual de 4,15% luego de la reconciliación.

El resultado del ajuste porcentual sobre el volumen de agua y el porcentaje de sólidos para las colas finales se presenta a continuación en la Figura 50, donde al igual que en los demás resultados presentados hasta ahora se observa la marcada distorsión para el día 23-05 producto

de la baja utilización de la planta durante este día, lo que se traduce como un alto consumo de agua relacionado a una bajo tratamiento de mineral durante el día.

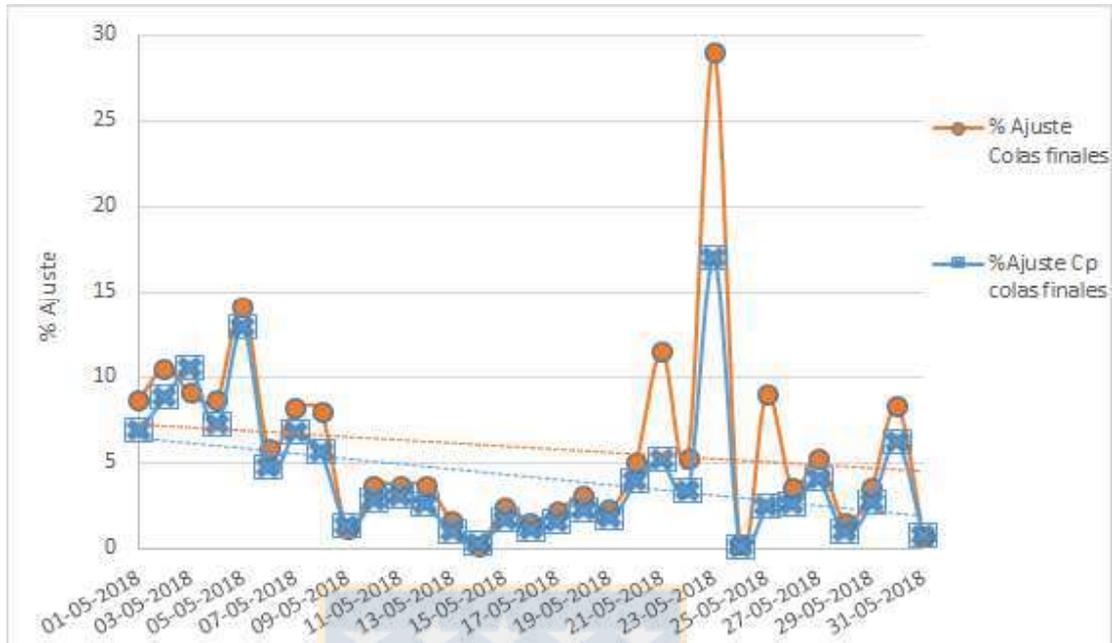


Figura 50: Ajuste porcentual sobre volumen de agua y porcentaje de sólido en corriente de colas finales Línea 2.

Siguiendo con el análisis sobre el balance de agua en el relave final, se estudia el registro de distribución de alimentación a los espesadores de relaves TK-014, TK-015 y TK-016, donde sorprendentemente muestra peor representatividad en las mediciones comparado con la Línea 1 para el mismo punto, por lo que es este nodo el que sufre los mayores ajustes durante la reconciliación del balance en la Línea 2.

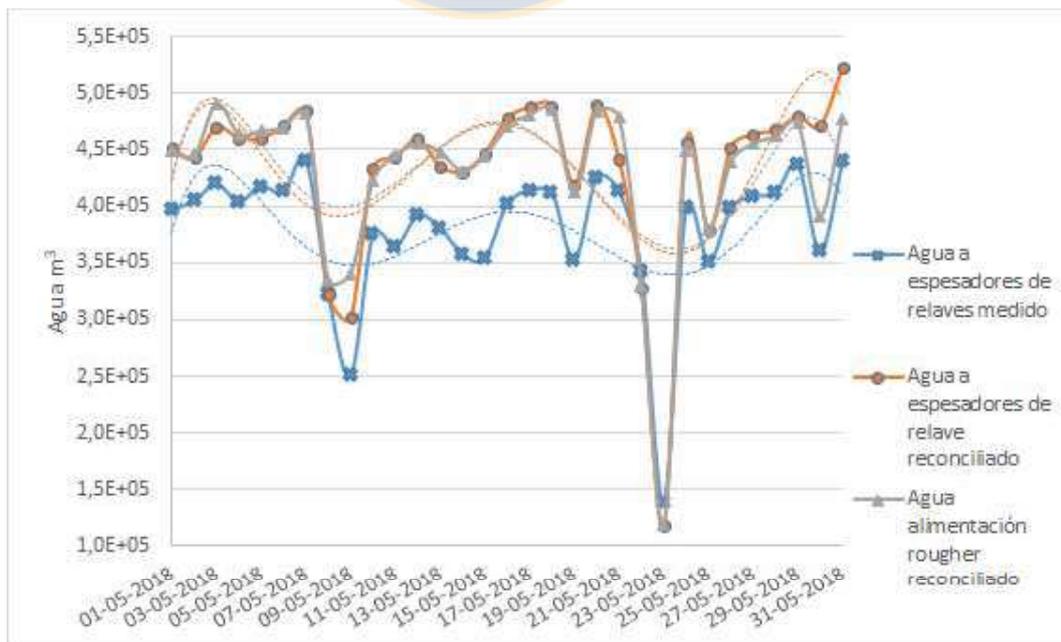


Figura 51: Comparación Resultado de balance y reconciliación para volumen de agua en alimentación a espesadores de relave con valor para agua en alimentación Rougher reconciliado Línea 2.

Los resultados expuestos en la Figura 51 muestran importantes diferencias en la magnitud del agua cuantificada según instrumentación respecto al agua que ingresa al sistema, esta diferencia es del orden de 1.581.090 m³ durante el mes de estudio, lo que representa una diferencia entre la medición de agua en la entrada al sistema y la medición de salida del sistema del 11,82% sobre el valor totalizado del balance.

El ajuste porcentual sobre el volumen de agua en la alimentación a los espesadores TK-014, TK-015 y TK-016 se expone a continuación en la Figura 52.

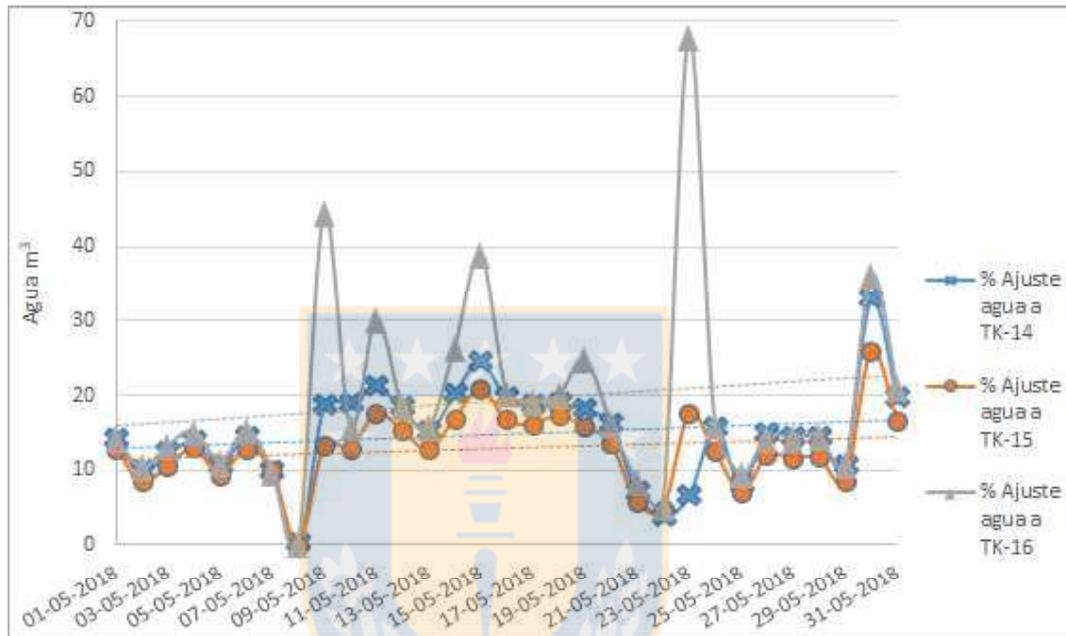


Figura 52: Ajuste porcentual sobre alimentación de espesadores de relave TK-014, TK-015 y TK-016, Línea 2.

Al observar el resultado del ajuste, se hace notorio que la mayor variación porcentual la sufre el volumen de agua hacia el TK-016, este fenómeno se explica debido a que según la información obtenida desde la instrumentación sin reconciliar, la alimentación del TK-016 presenta la información con mayor variabilidad y además recibe la menor carga de pulpa entre los tres espesadores, por lo que al prorratear la diferencia de volumen entre las tres corrientes, la alimentación al TK-016 resiente de una mayor sensibilidad ante el ajuste.

Lo descrito en el párrafo anterior se observa en la Figura 53, la que muestra la medición sin reconciliar del volumen de agua en la alimentación hacia los espesadores, donde el volumen total de agua hacia el TK-014 es de 3.884.066 m³, 4.463.367 m³ para el TK-015 y 3.444.270 m³ para el TK-016.

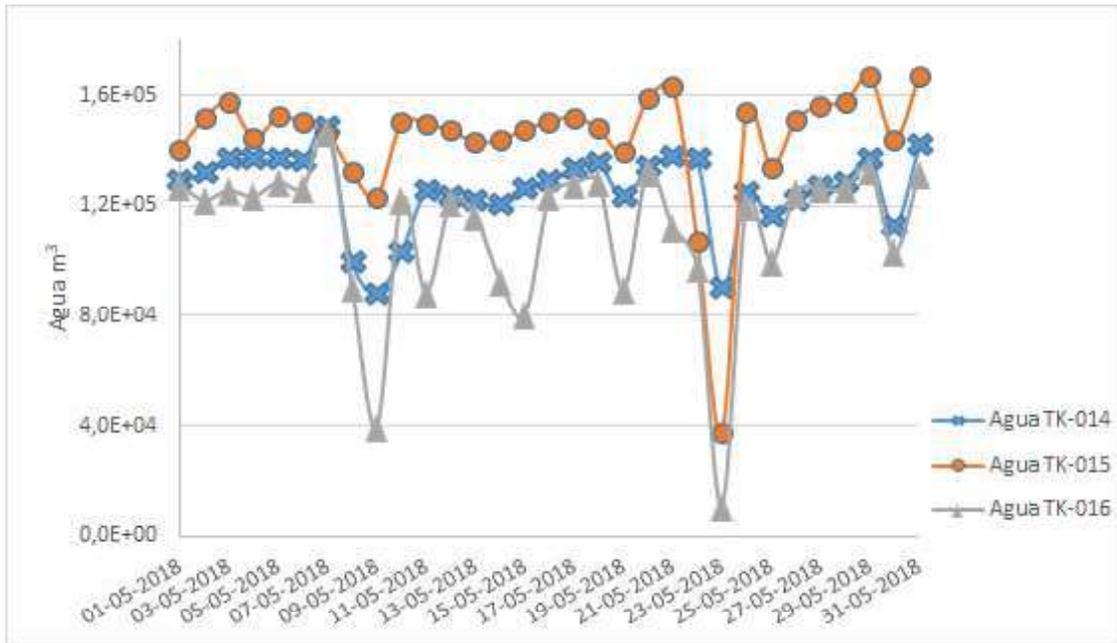


Figura 53: Volumen de agua no reconciliado para alimentación a espesadores de relave TK-015, TK-016 y TK-018, Línea 2.

Continuando con el análisis sobre los resultados del balance y reconciliación en los espesadores de relaves, a continuación en las Figuras 54, 55 y 56 se muestran los porcentajes de sólidos de las descargas de los espesadores de relave TK-014, TK-015 y TK-016.

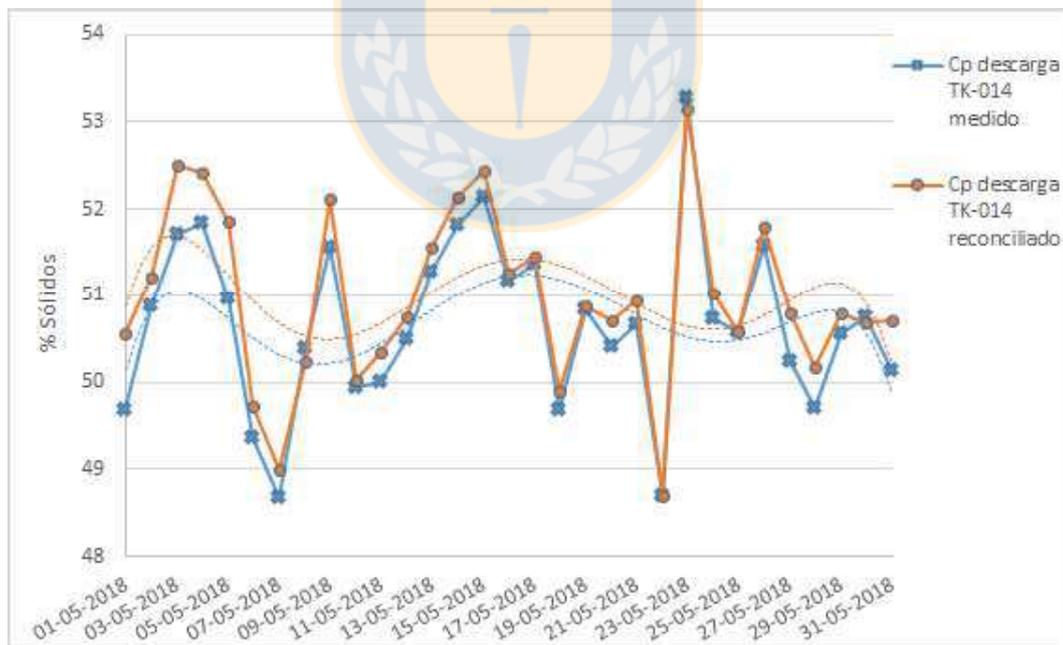


Figura 54: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-014.

Lo observado en la Figura 54 muestra un aumento del porcentaje de sólidos ponderado para el TK-014 desde 50,69% al 50,98%, aumento que representa un ajuste porcentual global del 0,59% y que no representa en mayor medida mejoras cuantificables en la operación de la descarga.

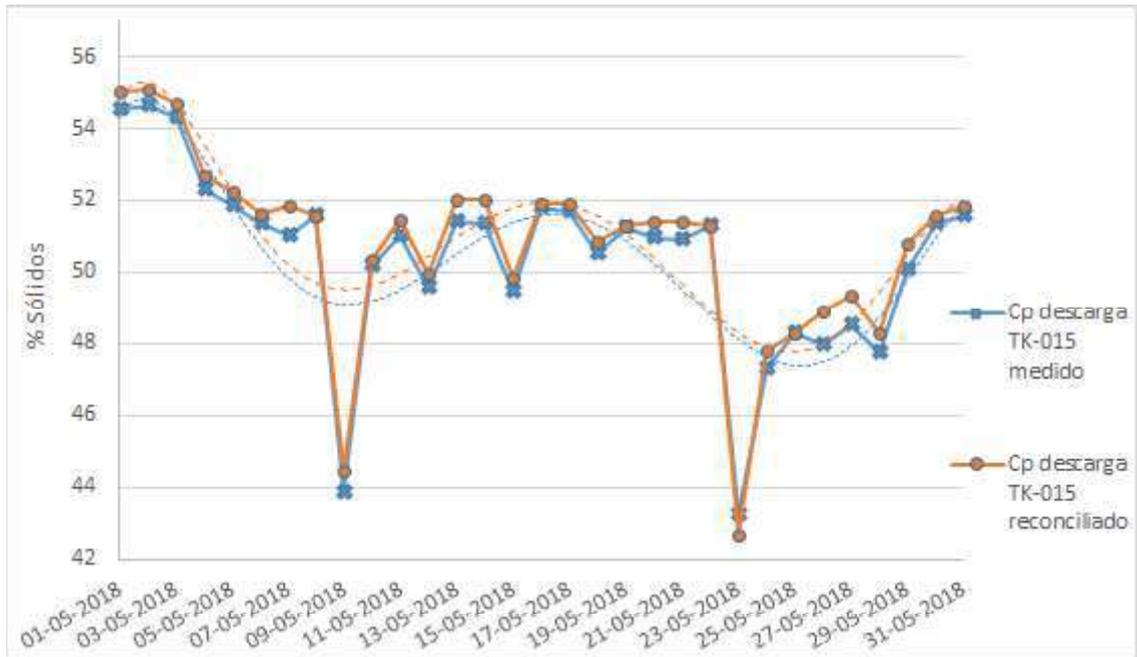


Figura 55: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-015.

La Figura 55 muestra un aumento desde 50,42% de sólidos hacia 50,80% de sólidos para la descarga del TK-015, variación que representa un ajuste porcentual del 0,76%.

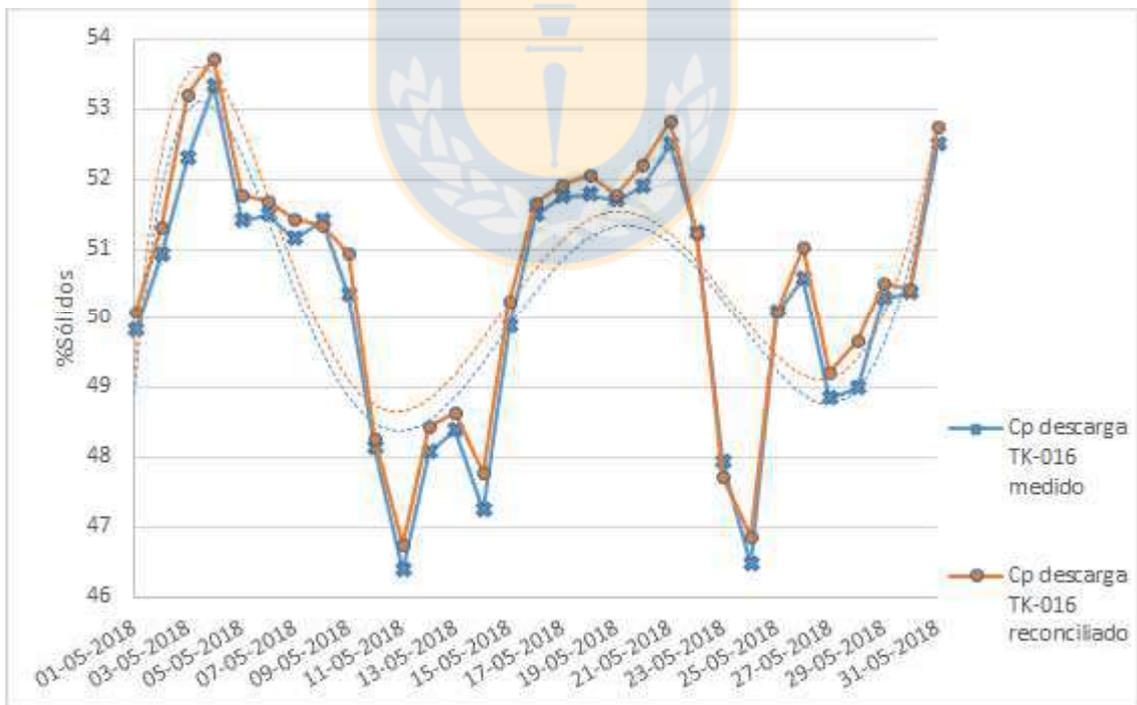


Figura 56: Resultado de balance y reconciliación del porcentaje de sólido en la descarga del espesador de relaves TK-016.

Mientras que para el caso de la Figura 56 los resultados del balance y reconciliación sobre el porcentaje de sólidos en la descarga del TK-016 muestran un aumento desde el 50,28% medido hasta un 50,57% reconciliado, variación que representa un ajuste de 0,58% en el ponderado mensual.

Finalmente, luego de revisar todos los resultados del balance de agua y reconciliación para Laguna Seca Línea 2, se presentan los resultados para las tasas de consumo reconciliadas y se comparan a los valores entregados en el Reporte de consumo de NPI y de la planilla de instrumentación para el cálculo de las tasas de consumo.

Al revisar los resultados expuestos en la Figura 57, es notorio que la tasa de consumo reconciliada es menor a los valores presentados tanto por el reporte de NPI y por la planilla de cálculo para la tasa de consumo.

Para el caso del reporte de consumo emitido por NPI, el valor de tasa de consumo ponderado durante el mes fue de $0,94 \frac{m^3}{ton}$, lo que representa un exceso de $157.764 m^3$ en el volumen cuantificado como consumo en el reporte, esto básicamente por las diferencias en el cálculo del parámetro explicadas previamente para la Línea 1 en los resultados de la Figura 34.

Analizando de igual forma los resultados entregados por la planilla de cálculo por instrumentación, la tasa de consumo ponderada mensual alcanza los $0,93 \frac{m^3}{ton}$, representando un exceso en la medición de consumo de agua de $107.570 m^3$ mensuales.

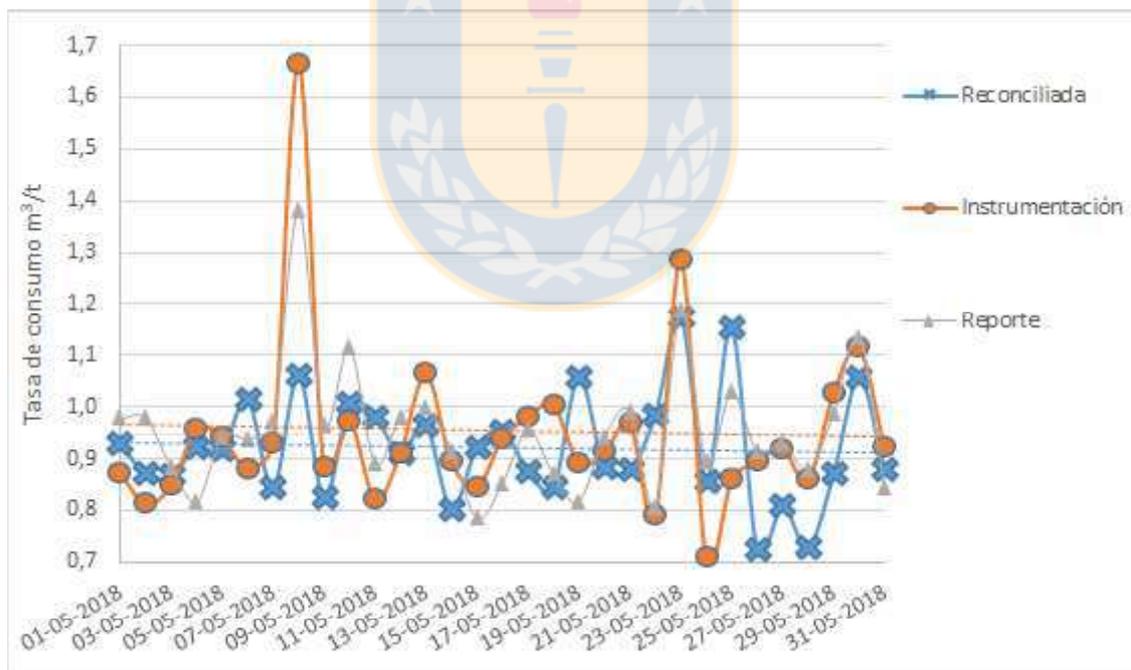


Figura 57: Comparación de Tasas de consumo de agua de procesos para la Línea 2 según planilla de instrumentación de agua de suministro, reporte de consumo de agua de NPI y reconciliación de agua recuperada.

Mientras que para el caso de la tasa de consumo reconciliada, el valor ponderado mensual es de $0,90 \frac{m^3}{ton}$, siendo la tasa de consumo reconciliada un cálculo directo sobre la performance individual de Laguna Seca línea 2.

Las diferencias diarias en volumen de agua de procesos según la comparación de las tasas de consumo se presentan a continuación en la Figura 58.



Figura 58: Diferencia en volumen de agua de procesos que significa la reconciliación de la tasa de consumo para Laguna Seca Línea 2 según resultados del reporte NPI y planilla de cálculo según instrumentación.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se actualizó la malla nodal del balance de agua para Laguna Seca Línea 1 y se construyó la malla nodal para el balance de agua en Laguna Seca Línea 2.

Las deficiencias en la instrumentación de ambas Líneas perjudican la redundancia del modelo y con esto los resultados de la reconciliación.

Según la reconciliación, la adición de agua no cuantificada en la flotación *Rougher* es de 1.836.244 m³ durante el mes del muestreo, con un 28,64% de sólidos para la corriente, lo que se aleja fuertemente de criterios definidos como parámetros operacionales y de diseño.

El valor ponderado mensual reconciliado para el porcentaje de sólidos en la descarga de los espesadores de relaves en la Línea 1 no alcanza el 52,50% de sólidos definidos como parámetros de diseño.

El valor para las tasas de consumo reconciliadas para Laguna Seca Línea 1 es de 1,00 $\frac{m^3}{t}$, verificándose una importante diferencia respecto a los 0,89 $\frac{m^3}{t}$ cuantificados en el reporte de NPI

y de los $0,94 \frac{m^3}{t}$ contabilizados por la planilla de cálculo de tasas de consumo según instrumentación, lo que equivale a $447.331 m^3$ y $212.637 m^3$ de diferencia respectivamente.

Los resultados reconciliados muestran una disminución de $120.554 m^3$ de agua en la alimentación *Rougher* para la Línea 2, alcanzando un 26,36% de sólido, por debajo de los parámetros definidos en los criterios de diseño y de operación.

El valor ponderado mensual reconciliado para el porcentaje de sólidos en la descarga de los espesadores de relaves en la Línea 2 es concluyentemente inferior al 51,0% definido como criterio de diseño y no se ajusta al 53,0% de sólidos definido como objetivo operacional.

El valor para la tasa de consumo reconciliada ponderada mensual para Laguna Seca Línea 2 es de $0,90 \frac{m^3}{t}$, lo que muestra un sobrecargo respecto al reporte de NPI, cuya tasa de consumo ponderada mensual es de $0,94 \frac{m^3}{t}$, mientras que la planilla de cálculo según instrumentación informa de $0,93 \frac{m^3}{t}$, lo que equivale a $157.764 m^3$ y $107.570 m^3$ de diferencia respectivamente.

Debido al estado de medición sobre la etapa de espesamiento de concentrado de ambas plantas concentradoras, el resultado del balance de agua y reconciliación en el espesamiento de concentrado es no concluyente y no representativo.

Para la Línea 1, las pérdidas de eficiencia en el consumo de agua más importantes se producen por la adición no cuantificada de agua en el nodo de flotación *Rougher*, la mayor proporción de agua en las colas finales y por no alcanzar porcentajes de sólidos adecuados a lo que la operación demanda en la descarga de los espesadores de relave.

En el caso de Laguna Seca Línea 2, las mayores pérdidas de eficiencia en el consumo de agua se producen principalmente por los bajos porcentajes de sólidos alcanzados en la descarga de los espesadores de relaves.

El estado de instrumentación actual en ambas plantas no permite el cierre completo de los balances de agua, resultando la Línea 1 más perjudicada por este motivo.

5.2. RECOMENDACIONES

5.2.1. RECOMENDACIONES OPERACIONALES

Es necesario aumentar la eficiencia de la recuperación de agua para ambas plantas concentradoras en la etapa de espesamiento de relaves, mejorando el desempeño operacional y el porcentaje de sólido en la descarga de los espesadores, buscando alcanzar valores superiores a los parámetros definidos como criterios de operación.

En el mismo sentido, es relevante mejorar el control operacional sobre el volumen de agua recuperada como sobrenadante de los espesadores de relave.

Se debe evitar legar la eficiencia de recuperación de agua al tranque de relaves, es sabido que dadas las condiciones geográficas y ambientales donde está emplazado, se constituye como un proceso poco optimizable y poco eficiente, realizándose la importancia del estudio sobre la etapa de espesamiento de relaves y el análisis de tecnologías de separación sólido que permitan mejorar la recuperación de agua en el proceso.

5.2.2. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Se hace imperativo la habilitación de los flujómetros de alimentación y densímetros a las baterías de ciclones CS-002, CS-003 y CS-004, instrumentación mínima que permite realizar el modelamiento del balance de mineral y agua en los molinos de bolas MB-002, MB-003 y MB-004, además de permitirle a los operadores controlar los niveles de los sumideros, evitar embancamiento de canaletas, realizar estimación en línea y control de molienda por carga circulante, entre otras oportunidades de mejora para la operación.

Junto a esto, se sugiere un plan de verificación y contrastación para el flujómetro de alimentación de pulpa a la batería de ciclones CS-001, instrumento que actualmente es el único en funcionamiento.

Se sugiere colocar los flujómetros de alimentación a las baterías de ciclones con la misma disposición a la que se encuentra la instrumentación en el MB-004 y en la molienda de Laguna Seca Línea 2, esto permite mejor acceso y visibilidad, tratándose de un cambio de fácil aplicación por ser flujómetros con tecnología no invasiva.

Por motivos de cierre de balance de agua, se necesita la implementación de un flujómetro para el agua de dilución en remolienda tanto para Laguna Seca Línea 1 y Laguna Seca Línea 2, esto debido a que según el modelo, diariamente se adicionan 40.000 m³ de agua no cuantificada sólo a la Línea 1.

Se hace necesario mejorar las condiciones del sistema de agua de lavado para la etapa de Limpieza Columnar en Laguna Seca Línea 1, esto requiere de un proyecto que evite utilizar agua proveniente desde una red de agua provisoria, la cual afecta el cierre del balance al tratarse de ser agua no contabilizada y puede acarrear condiciones inseguras a la operación.

Se requiere mejorar las condiciones de medición de las variables del espesamiento de relaves en ambas líneas, específicamente realizar la verificación de la calidad de las mediciones en la alimentación a la etapa de espesamiento.

Para el caso del balance de agua se requiere fortalecer la medición del agua recuperada desde cada espesador de relaves, como fue demostrado con la medición de agua recuperada desde el TK-008 al TK-014.

Por motivos de control operacional se sugiere medir el flujo de concentrado hacia la etapa de espesamiento.

Para efectos de análisis de datos y mejoramiento en la operación, se sugiere habilitar las sondas de análisis químico para las corrientes de alimentación a la primera limpieza y alimentación a la limpieza columnar de Laguna Seca Línea 1 que se encuentran fuera de operación, así como habilitar la extracción de la información en línea de los Cp para las corrientes de concentrado final en ambas concentradoras.

Para mejorar el actual estado de medición en 6 puntos sobre la flotación de Laguna Seca Línea 1, es importante adicionar nuevas sondas de muestreo y análisis químico en Línea para las corrientes de concentrado *Scavenger*, Colas de limpieza columnar y alimentación a la etapa de remolienda.

En el mismo sentido, se sugiere rediseñar el muestreo y análisis para el concentrado y las colas de las columnas de limpieza *Rougher* y *Scavenger* de la Línea 2, las cuales no fueron incluidas en esta memoria por entregar información incoherente al balance y perjudicar el cierre del balance global.

Se sugiere implementar instrumentación para medir el flujo de agua de lavado en las columnas de flotación de la Línea 2.

Para permitir el adecuado cierre del balance de agua se hace necesario medir el agua recuperada desde los TK-021 y TK-022 de espesamiento de concentrado, agua que posteriormente pasa al clarificador TK-029 el cual no fue incluido en el balance de Laguna Seca Línea 2 por no contar con data vital para el cierre del balance.

6. BIBLOGRAFÍA

- BHP Billiton (2016), *Informe de sustentabilidad BHP Chile 2016*. Chile.
- BHP Billiton (2017), BHP Sustainability report 2017.
- Cochilco (2016), *Consumo de agua en la minería del Cobre al 2016*. Chile.
- Cochilco (2017), *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028*.
- Coello, A., (2015), *Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda*, *Minería y Geología*, v.31, 66-79. 2018, febrero 13. De <https://revista.ismm.edu.cu> Base de datos.
- Cutting, G., (1976), *Estimation of interlocking mass balances on complex mineral beneficiation plants*, *Int. J. Min. Proc.*, 3, 207.
- Deiana, A., Granados, D., & Sardella, M. (2018). *Introducción a la Ingeniería*. Capítulo VI Balance de Masa. (pp.2-10). San Juan, Argentina: Departamento de Ingeniería Química-FI-UNSJ.
- Frew, J., (1983), *Computer-aided design of sampling systems*, *Int. J. Min. Proc.*, 11, 255.
- González, M. (2016). *Técnicas de reconciliación de datos: Aplicación a industria*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Guerrero, A., & Díaz, G. (2007). *Introducción de errores en la medición*. Medellín, Colombia: ITM.
- Gutiérrez, L., (2017), *Procesamiento de Recursos Mineros no Cupríferos. Capítulo 2: Balance Metalúrgico*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Kracht, W. & Casali, A., (2011), *Reconciliación de datos experimentales: Análisis y simulación de procesos mineralúrgicos*, Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Narasimhan, S. & Jordache, C., (2000), *Data Reconciliation & Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data*, Houston, TX: Gulf Publishing Company.
- Zúñiga, J., (2003), *Técnicas experimentales en física general. Capítulo 3: Propagación de incertidumbres*. Valencia, España: Facultat de Física - Universitat de València.
- Smith, H., & Frew, J., (1983), *Design and analysis of sampling experiments: a sensitivity approach*, *Int J. Min. Proc.*, 11, 267.

- Wills, B., & Fich, J., (2015), *Mineral Processing Technology: An Introduction to the practical Aspect of Ore Treatment and Mineral Recovery*, Oxford, UK: Elsevier Ltd.
- Yianatos, J., (2008), *Flotación de Minerales*, Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.



7. ANEXOS

7.1. LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

Esta ley también denominada Ley de Lomonósov-Lavoisier se enuncia en la frase “la masa no se crea ni se destruye”, la que según la información entregada por Deiana et al (2018) se expresa matemáticamente para un sistema abierto de la siguiente forma,

$$\begin{bmatrix} \text{Variación de} \\ \text{inventario de masa } M \\ \text{en el sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Entradas de} \\ \text{masa } M \\ \text{al sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Salidas de} \\ \text{masa } M \\ \text{al sistema} \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} \text{Generación o Consumo} \\ \text{de masa } M \\ \text{en el sistema} \end{bmatrix} \quad (12)$$

7.1.1. BALANCE EN ESTADO ESTACIONARIO

Un balance de materia en estado estacionario verifica que,

$$\begin{bmatrix} \text{Variación de} \\ \text{inventario de masa } M \\ \text{en el sistema} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (13)$$

Lo que implica que,

$$\begin{bmatrix} \text{Entradas de} \\ \text{masa } M \\ \text{al sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Salidas de} \\ \text{masa } M \\ \text{al sistema} \end{bmatrix} \quad (14)$$

7.2. MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

Los multiplicadores de Lagrange son un método matemático que mediante la aplicación de la teoría del cálculo derivacional permite encontrar los máximos y mínimos de una función.

Razón por la cual, son ampliamente empleado como método de reconciliación de data y optimización para procesos industriales, siendo utilizados en esta ocasión para satisfacer la ley de conservación de la masa en el balance de agua en Laguna Seca L1 y L2.

Siguiendo la metodología empleada por Gutierrez (2017) donde se expone que para reconciliar los datos, el método de los multiplicadores de Lagrange busca minimizar el cuadrado de las diferencias entre variables medidas y calculadas, ponderando un factor de peso, que básicamente indica el nivel de incertidumbre o confiabilidad de la medición.

De lo anterior, la función objetivo a minimizar es,

$$\phi = \sum_{i=1}^m W_i (f_i - F_i)^2 \quad (15)$$

Con,

f_i : Valor medido o experimental para el flujo i

F_i : Valor ajustado para el flujo i

W_i : Factor de peso de la variable

m : Número de variables independientes

Además, se incorpora a la función objetivo un término que incluye las ecuaciones de balance de masa en los n nodos como restricciones al sistema de ecuaciones a resolver evaluadas en el valor reconciliado F_i .

$$\sum_{i=1}^m K_{ij}F_i = 0 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

n : Número de nodo

K_{ij} : Parámetros o coeficientes de la j – esima restricción en el flujo i

La función objetivo queda expresada como sigue

$$\phi(F_i, \lambda_j) = \sum_{i=1}^m W_i(f_i - F_i)^2 + \sum_{j=1}^n \lambda_j \sum_{i=1}^m K_{ji}F_i \quad (17)$$

Aplicando teoría de cálculo derivacional de máximos y mínimos, se procede a calcular los puntos críticos de la función objetivo, para esto se deriva parcialmente esta función respecto a las variables F_i y λ_j .

Siendo el sistema algebraico de los multiplicadores de Lagrange a resolver,

$$\sum_{i=1}^m W_i F_i + \sum_{j=1}^n \lambda_j \sum_{i=1}^m K_{ij} = \sum_{i=1}^m W_i f_i \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_{ij} F_i = 0 \quad (19)$$

Lo que se expresa matricialmente como,

$$A \cdot B = C \quad (20)$$

Definiéndose,

$$A = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & \dots & 0 & \vdots & K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ 0 & W_2 & \dots & \vdots & \vdots & K_{12} & K_{22} & \dots & K_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_m & \vdots & K_{1m} & K_{2m} & \dots & K_{nm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2m} & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nm} & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$B = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$C = \begin{pmatrix} W_1 f_1 \\ W_2 f_2 \\ \vdots \\ W_m f_m \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$



El vector solución B , que contiene los valores de la data reconciliada y los multiplicadores de Lagrange se obtiene a partir del producto entre la matriz inversa de A (A^{-1}) y el vector C compuesto de los datos muestreados a reconciliar f_i multiplicados por los factores de peso W_i .

$$B = A^{-1} \cdot C \quad (24)$$

7.3. ECUACIONES UTILIZADAS PARA ESTIMACIÓN DE FLUJOS

$$C_{p,i} = \frac{m_s}{m_s + m_l} * 100 \% \quad (25)$$

$$\rho_{putpa} = \frac{\rho_s * \rho_l}{\rho_s * (100 - C_{p,i}) + \rho_l * C_{p,i}} \frac{t}{m^3} \quad (26)$$

Donde,

$C_{p,i}$: % Sólidos en Corriente i

ρ_{pulpa} : Densidad de Pulpa, $\frac{t}{m^3}$

ρ_s : Densidad de Sólidos, $\frac{t}{m^3}$

ρ_l : Densidad de líquido, $\frac{t}{m^3}$

m_s : Masa de Sólidos, t

m_l : Masa de Líquidos, t

7.3.1. CONSTANTES UTILIZADAS

$$\rho_l = 1.00 \frac{t}{m^3} \quad (27)$$

$$\rho_{s,1} = 2.79 \frac{t}{m^3} \quad (28)$$

7.4. DIAGRAMAS LAGUNA SECA LÍNEA 1

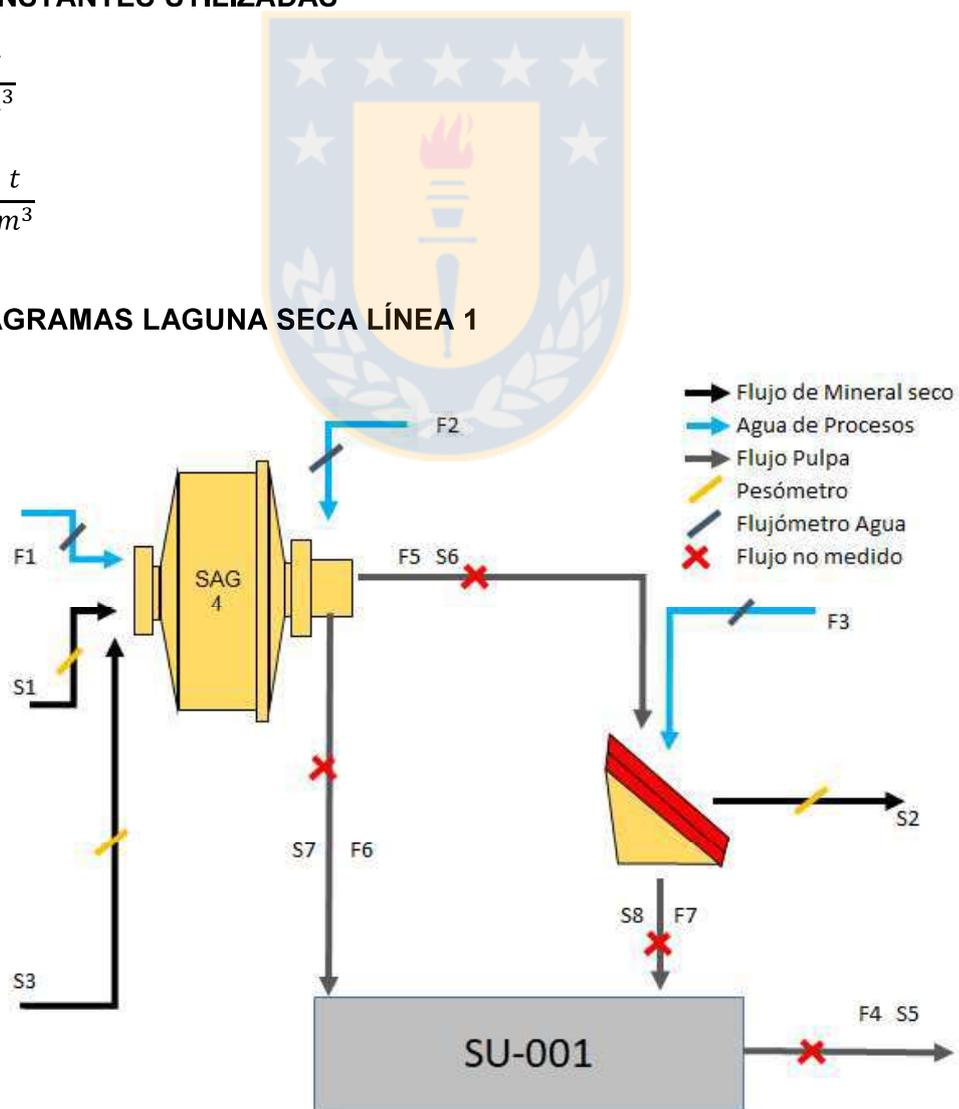


Figura 59: Diagrama de flujos sub sistema SAG 4, Línea 1.

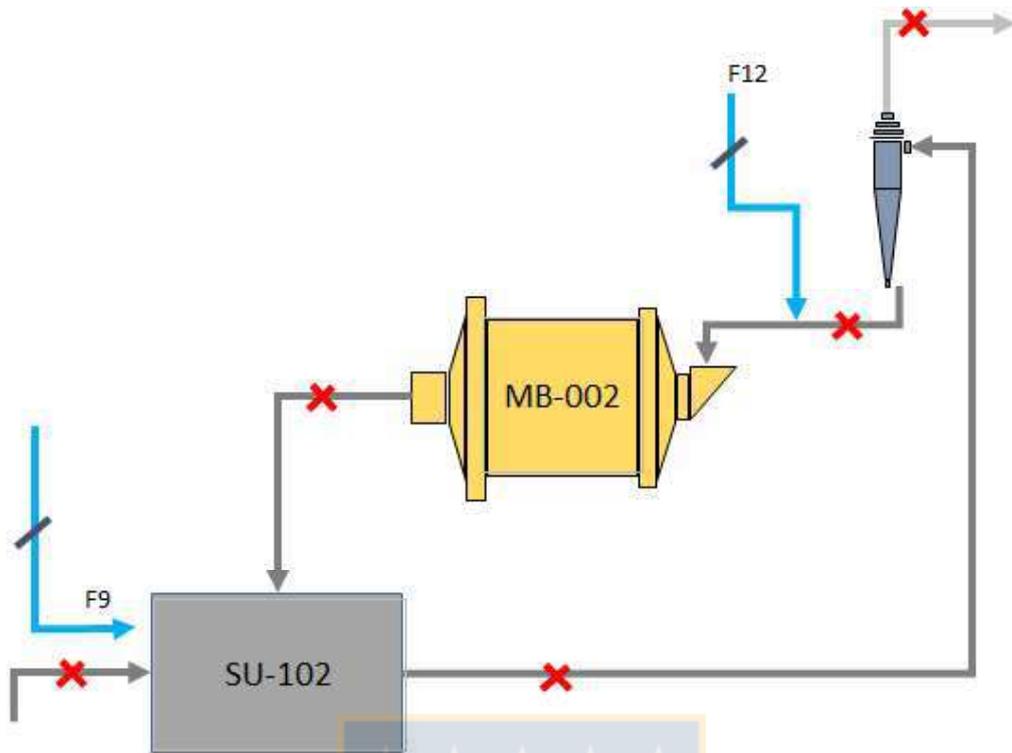


Figura 61: Diagrama Sub Sistema MB-002, CLS L1.

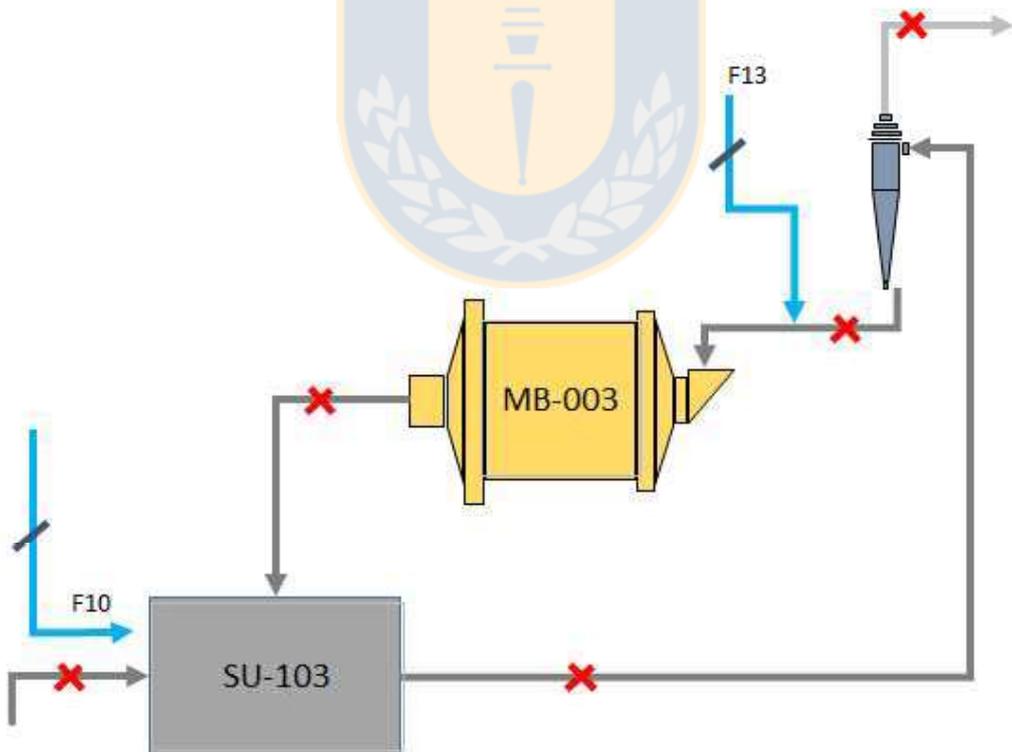


Figura 62: Diagrama Sub Sistema MB-003, CLS L1.

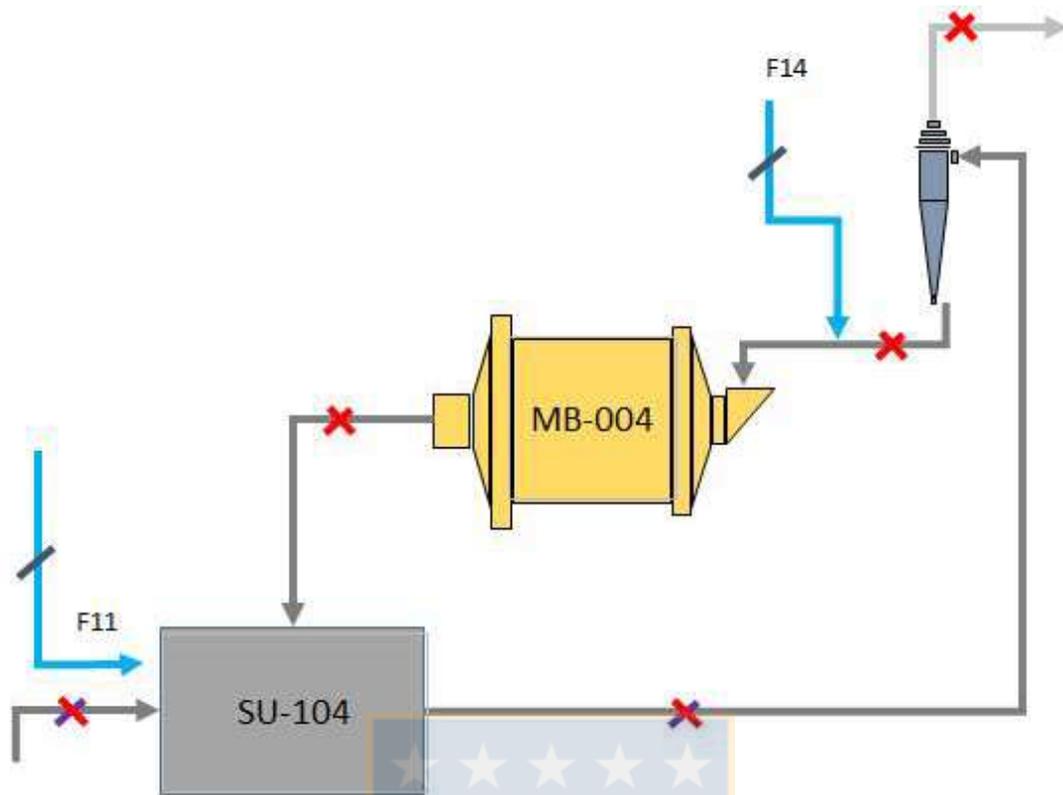


Figura 63: Diagrama Sub Sistema MB-004, CLS L1

7.4.3. ECUACIONES BALANCE DE SÓLIDOS MOLIENDA BOLAS LÍNEA 1

$$S5 - S9 = 0 \quad (36)$$

7.4.4. ECUACIONES BALANCE DE AGUA MOLIENDA BOLAS LÍNEA 1

$$F4 + F8 + F9 + F10 + F11 + F12 + F13 + F14 + F15 - F16 = 0 \quad (37)$$

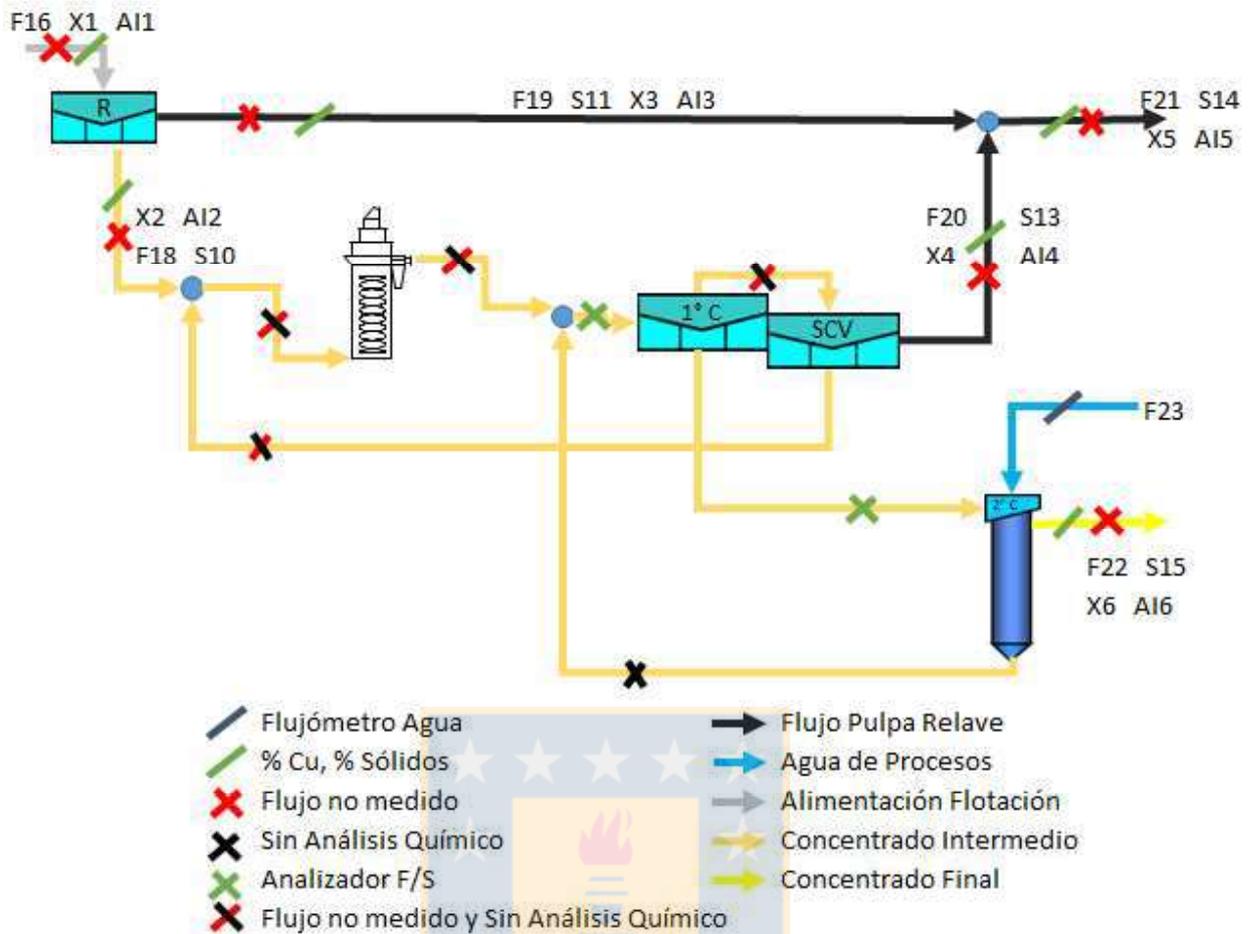


Figura 64: Diagrama Sub Sistema Flotación CLS L1

7.4.5. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS FLOTACIÓN LÍNEA 1

$$S9 - S10 - S11 = 0 \quad (38)$$

$$S11 + S12 - S13 = 0 \quad (39)$$

$$S9 - S14 - S15 = 0 \quad (40)$$

7.4.6. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA FLOTACIÓN LÍNEA 1

$$F16 + F17 - F18 - F19 = 0 \quad (41)$$

$$F19 + F20 - F21 = 0 \quad (42)$$

$$F16 + F17 - F21 - F22 + F23 = 0 \quad (43)$$

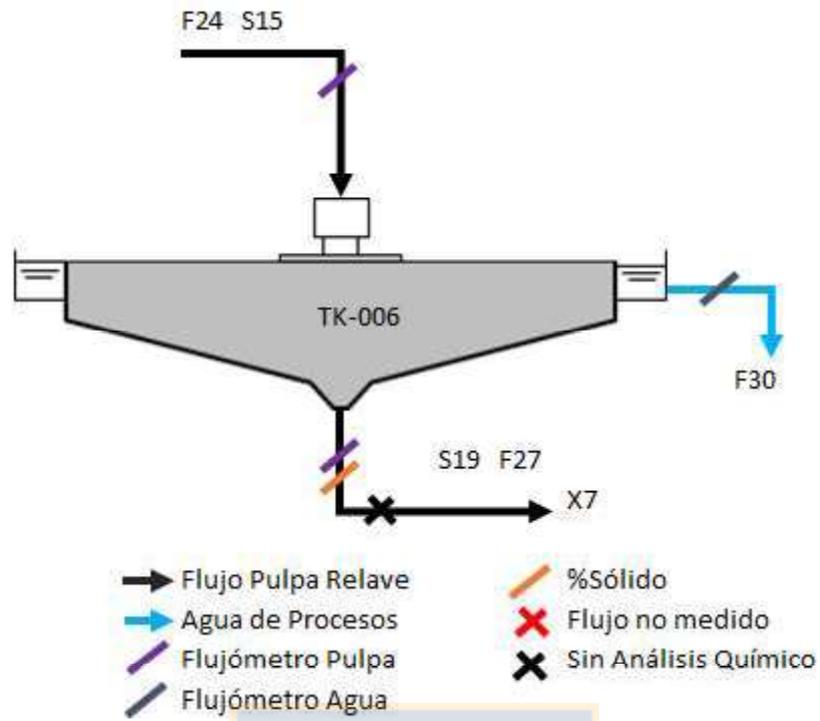


Figura 65: Diagrama Sub Sistema TK-006

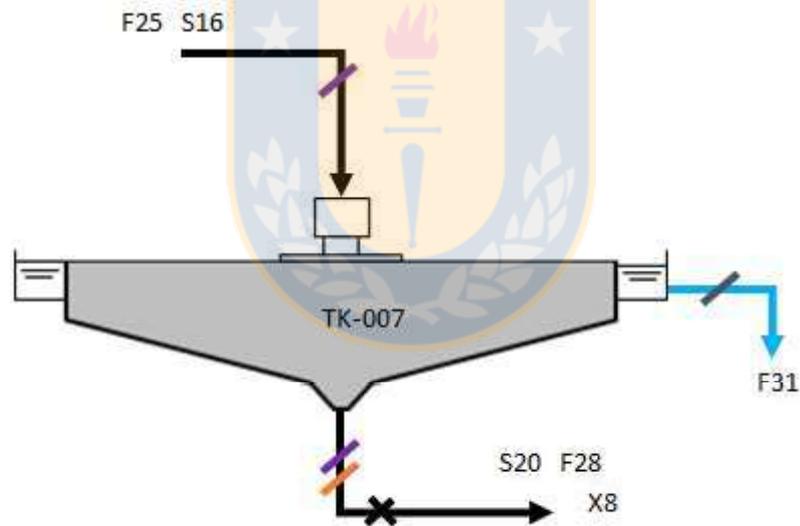


Figura 66: Diagrama Sub Sistema TK-007.

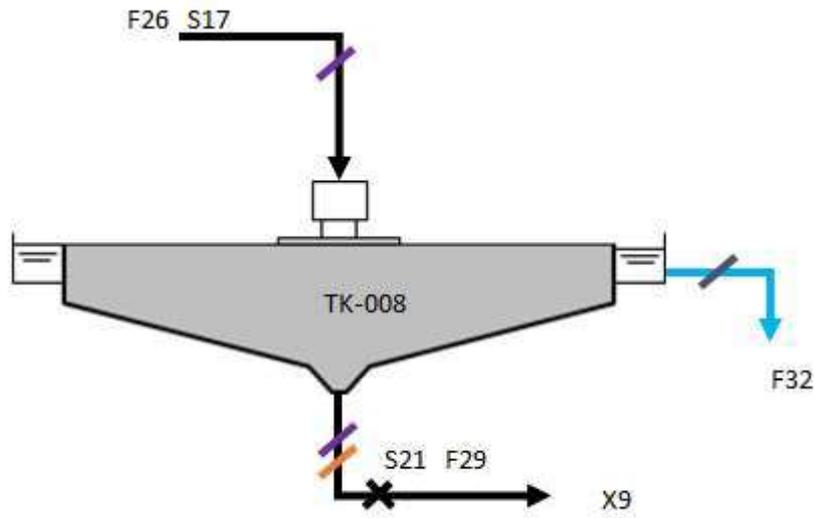


Figura 67: Diagrama Sub Sistema TK-008.

7.4.7. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 1

$$S14 - S16 - S17 - S18 = 0 \quad (44)$$

$$S16 - S19 - S22 = 0 \quad (45)$$

$$S17 - S20 - S23 = 0 \quad (46)$$

$$S18 - S21 - S24 = 0 \quad (47)$$

7.4.8. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 1

$$F21 - F24 - F25 - F26 = 0 \quad (48)$$

$$F24 - F27 - F30 - F33 = 0 \quad (49)$$

$$F25 - F28 - F31 - F34 = 0 \quad (50)$$

$$F26 - F29 - F32 - F35 = 0 \quad (51)$$

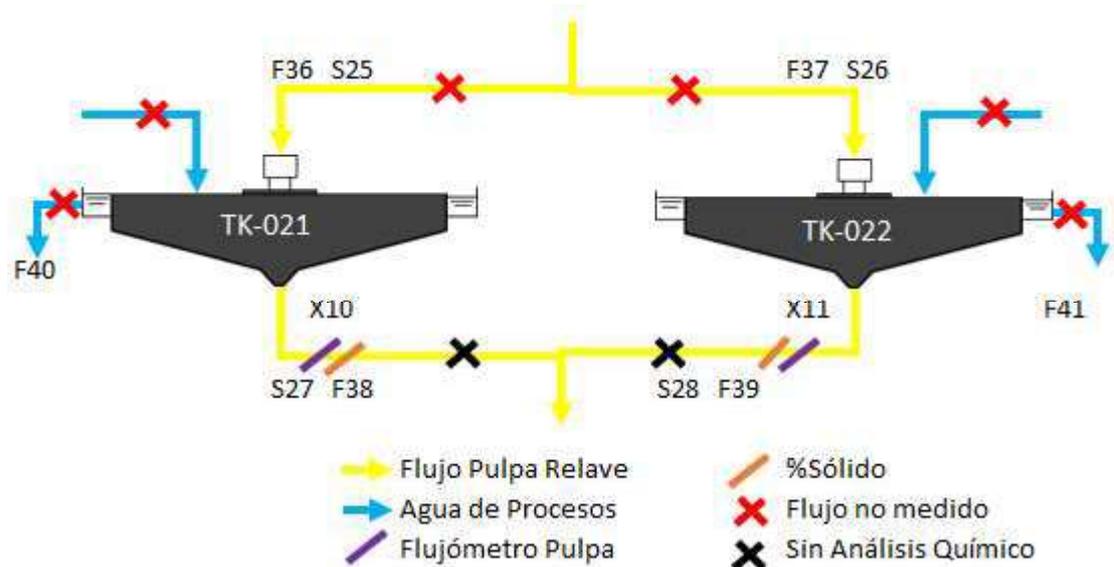


Figura 68: Diagrama Sub Sistema Espesamiento Concentrado.

7.4.9. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 1

$$S15 - S25 - S26 = 0 \quad (52)$$

$$S25 - S27 - S29 = 0 \quad (53)$$

$$S26 - S28 - S30 = 0 \quad (54)$$

7.4.10. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 1

$$F22 - F36 - F37 = 0 \quad (55)$$

$$F36 - F38 - F40 - F42 = 0 \quad (56)$$

$$F37 - F39 - F41 - F43 = 0 \quad (57)$$

$$F16 + F17 - F21 - F22 + F23 = 0 \quad (58)$$

Donde,

Tabla 9: Definición de variables para balance de masa en Laguna Seca Línea 1.

t/h		m ³ /h	
S1	Mineral fresco	F1	Agua SAG 4
S2	Pebble generado	F2	Agua Trommel
S3	Pebble recirculado	F3	Agua Harnero
S4	Pebble a piso	F4	Agua en SU-001
S5	Sólido en SU-001	F5	Bajotamaño Trommel
S6	Sólido Bajotamaño Trommel	F6	Sobretamaño Trommel
S7	Sólido Sobretamaño Trommel	F7	Bajotamaño Harnero
S8	Sólido Bajotamaño harnero	F8	Agua SU-101
S9	Alimentación Rougher	F9	Agua SU-102
S10	Concentrado Rougher	F10	Agua SU-103
S11	Colas Rougher	F11	Agua SU-104
S12	Colas Scavenger	F12	Agua Underflow CS-001
S13	Colas Finales	F13	Agua Underflow CS-002
S14	Concentrado final	F14	Agua Underflow CS-003
S15	Alimentación TK-006	F15	Agua Underflow CS-004
S16	Alimentación TK-007	F16	Agua Alimentación Rougher
S17	Alimentación TK-008	F17	Agua Dilución Rougher
S18	Descarga TK-006	F18	Concentrado Rougher
S19	Descarga TK-007	F19	Agua Colas Rougher
S20	Descarga TK-008	F20	Agua Colas Scavenger
S21	Invenario TK-006	F21	Agua Colas finales
S22	Invenario TK-007	F22	Agua Concentrado final
S23	Invenario TK-008	F23	Agua lavado columnas
S24	Alimentación TK-021	F24	Agua a TK-006
S25	Alimentación TK-022	F25	Agua a TK-007
S26	Descarga TK-021	F26	Agua a TK-008
S27	Descarga TK-022	F27	Agua descarga TK-006
S28	Inventario TK-021	F28	Agua descarga TK-007
S29	Inventario TK-022	F29	Agua descarga TK-008
		F30	Overflow TK-006
		F31	Overflow TK-007
		F32	Overflow TK-008
		F33	Inventario TK-006
		F34	Inventario TK-007
		F35	Inventario TK-008
		F36	Agua a TK-021
		F37	Agua a TK-022
		F38	Descarga TK-021
		F39	Descarga TK-022
		F40	Overflow TK-021
		F41	Overflow TK-022
		F42	Inventario TK-021
		F43	Inventario TK-022

7.5. DIAGRAMAS LAGUNA SECA LÍNEA 2

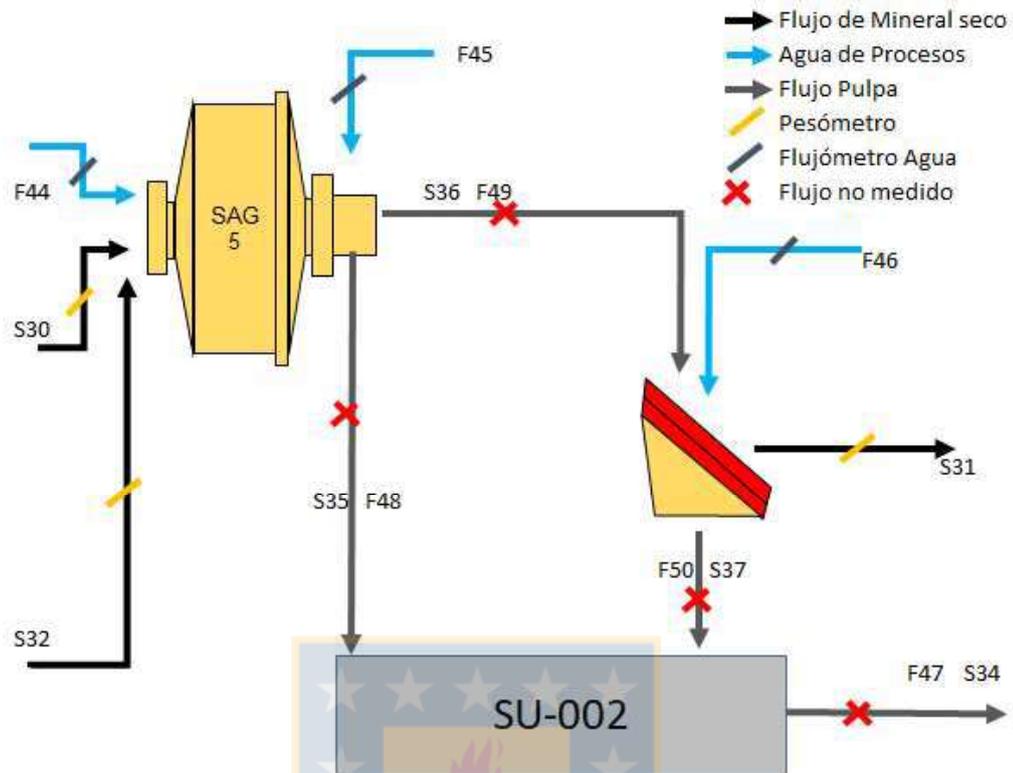


Figura 69: Diagrama subsistema SAG 5, Línea 2.

7.5.1. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS SAG 5 LÍNEA 2

$$S30 + S32 - S35 - S36 = 0 \quad (59)$$

$$S31 + S36 - S37 = 0 \quad (60)$$

$$S31 - S32 - S33 = 0 \quad (61)$$

$$S35 + S37 - S34 = 0 \quad (62)$$

7.5.2. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA SAG 5 LÍNEA 2

$$F44 + F45 - F48 - F49 = 0 \quad (63)$$

$$F46 + F49 - F50 = 0 \quad (64)$$

$$F48 + F50 - F47 = 0 \quad (65)$$

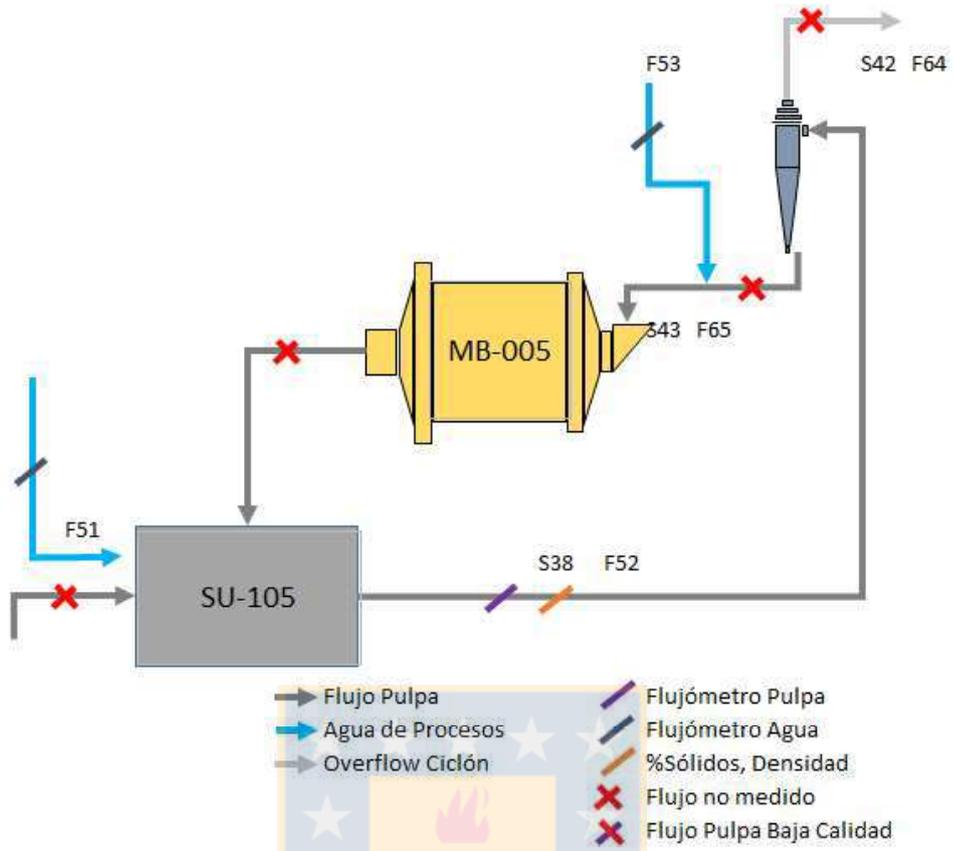


Figura 70: Diagrama subsistema MB-005, Línea 2.

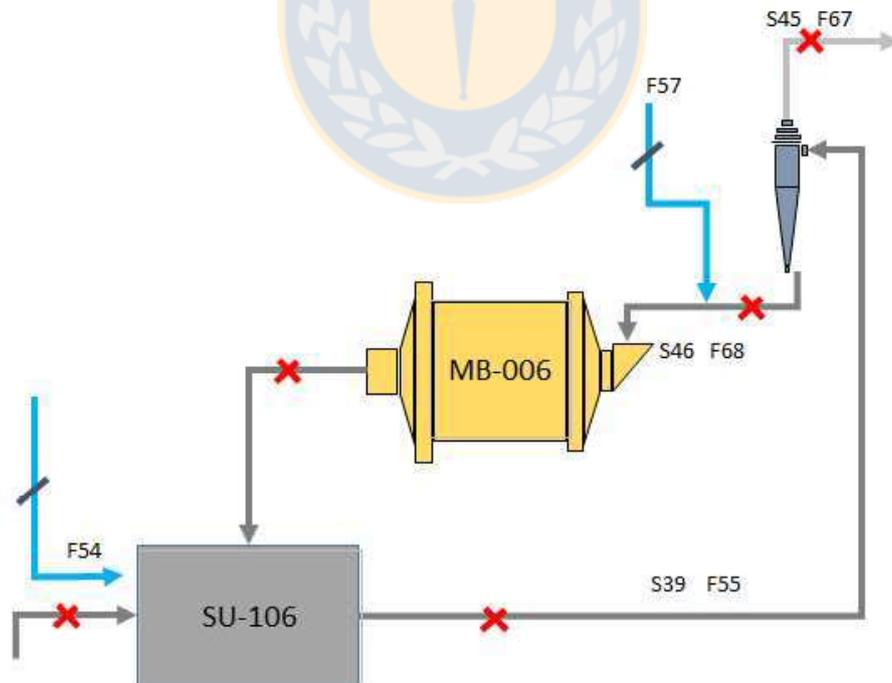


Figura 71: Diagrama subsistema MB-006, Línea 2.

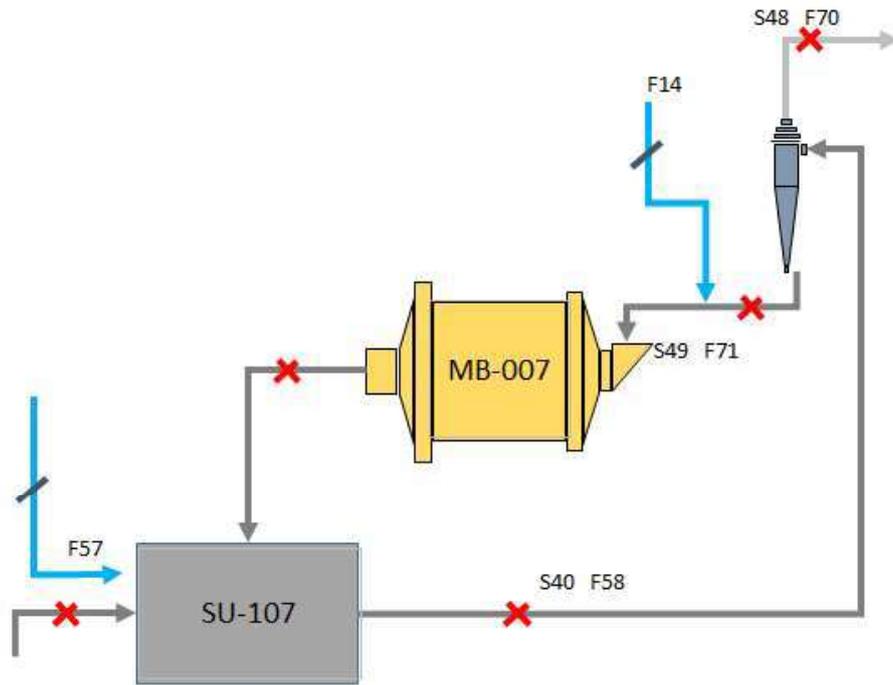


Figura 72: Diagrama subsistema MB-007, Línea 2.

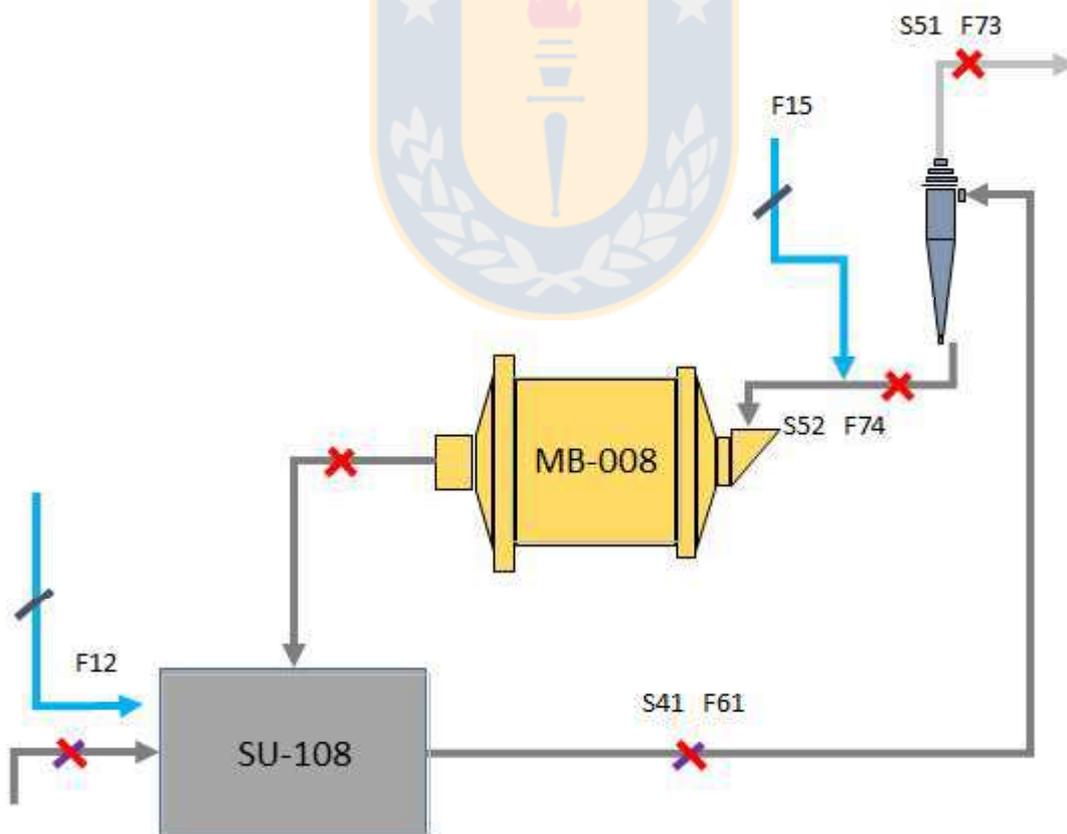


Figura 73: Diagrama subsistema MB-008, Línea 2.

7.5.3. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS MOLIENDA BOLAS LÍNEA 2

$$\alpha_1 * S_{34} - S_{38} + S_{44} = 0 \quad (66)$$

$$S_{38} - S_{42} - S_{43} = 0 \quad (67)$$

$$S_{43} - S_{44} = 0 \quad (68)$$

$$\alpha_2 * S_{34} - S_{39} + S_{47} = 0 \quad (69)$$

$$S_{39} - S_{45} - S_{46} = 0 \quad (70)$$

$$S_{47} - S_{48} = 0 \quad (71)$$

$$\alpha_3 * S_{34} - S_{40} + S_{50} = 0 \quad (72)$$

$$S_{40} - S_{48} - S_{49} = 0 \quad (73)$$

$$S_{49} - S_{50} = 0 \quad (74)$$

$$\alpha_4 * S_{34} - S_{41} - S_{53} = 0 \quad (75)$$

$$S_{41} - S_{51} - S_{52} = 0 \quad (76)$$

$$S_{52} - S_{53} = 0 \quad (77)$$

$$S_{34} - \alpha_1 * S_{34} - \alpha_2 * S_{34} - \alpha_4 * S_{34} - \alpha_4 * S_{34} = 0 \quad (78)$$

$$S_{42} + S_{45} + S_{48} + S_{51} - S_{54} = 0 \quad (79)$$



7.5.4. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA MOLIENDA BOLAS LÍNEA 2

$$F_{47} - \alpha_1 * F_{47} - \alpha_2 * F_{47} - \alpha_4 * F_{47} - \alpha_4 * F_{47} = 0 \quad (80)$$

$$\alpha_1 * F_{47} + F_{51} - F_{52} + F_{65} = 0 \quad (81)$$

$$F_{52} - F_{63} - F_{64} = 0 \quad (82)$$

$$F53 + F64 - F65 = 0 \quad (83)$$

$$\alpha 2 * F47 + F54 - F55 + F68 = 0 \quad (84)$$

$$F55 - F66 - F67 = 0 \quad (85)$$

$$F56 + F67 - F68 = 0 \quad (86)$$

$$\alpha 3 * F47 + F57 - F58 + F71 = 0 \quad (87)$$

$$F58 - F69 - F70 = 0 \quad (88)$$

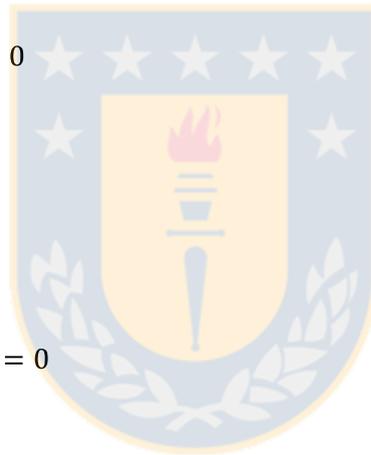
$$F59 + F70 - F71 = 0 \quad (89)$$

$$\alpha 4 * F47 + F60 - F61 + F74 = 0 \quad (90)$$

$$F61 - F72 - F73 = 0 \quad (91)$$

$$F62 + F73 - F74 = 0 \quad (92)$$

$$F63 + F67 + F69 + F72 - F75 = 0 \quad (93)$$



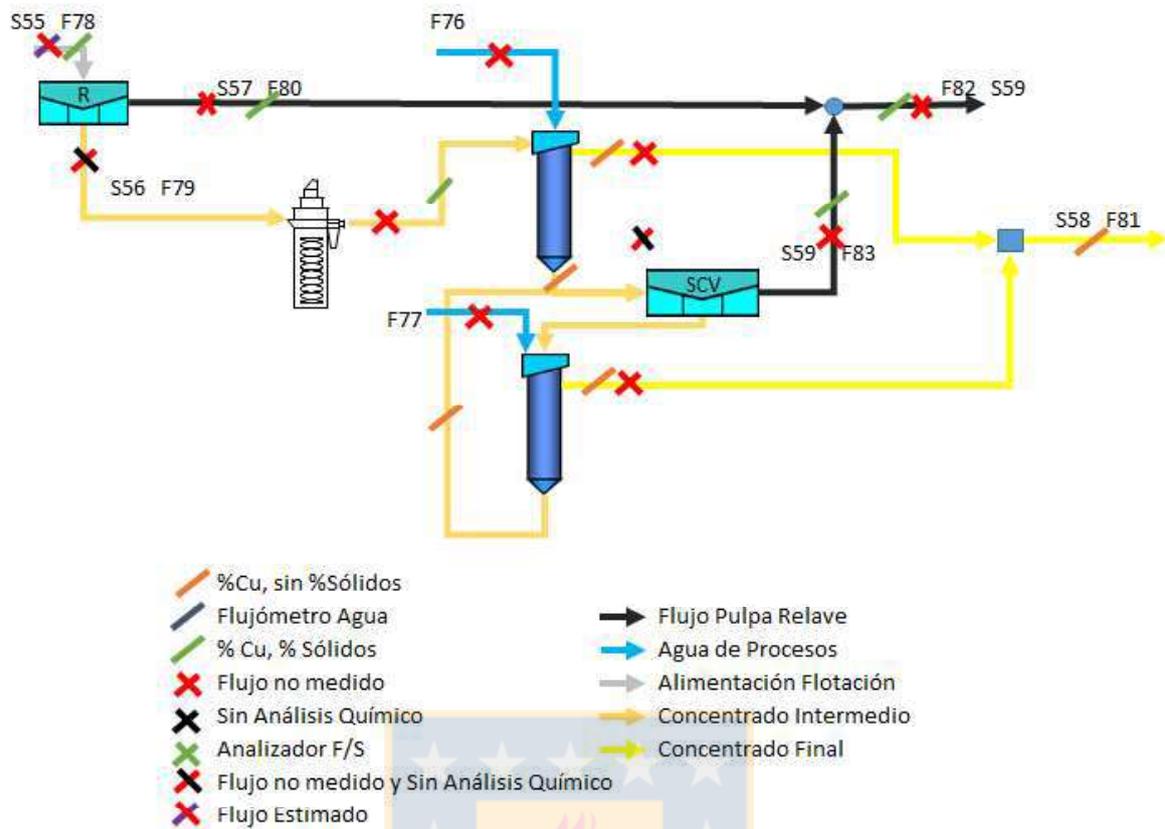


Figura 74: Diagrama subsistema flotación Línea 2.

7.5.5. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS FLOTACIÓN LÍNEA 2

$$S54 - S55 = 0 \quad (94)$$

$$S55 - S56 - S57 = 0 \quad (95)$$

$$S57 - S59 + S60 = 0 \quad (96)$$

$$S55 - S58 - S59 = 0 \quad (97)$$

7.5.6. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA FLOTACIÓN LÍNEA 2

$$F75 - F78 = 0 \quad (98)$$

$$F78 - F79 - F80 = 0 \quad (99)$$

$$F80 - F82 + F83 = 0 \quad (100)$$

$$F76 + F77 + F78 - F81 - F82 = 0 \quad (101)$$

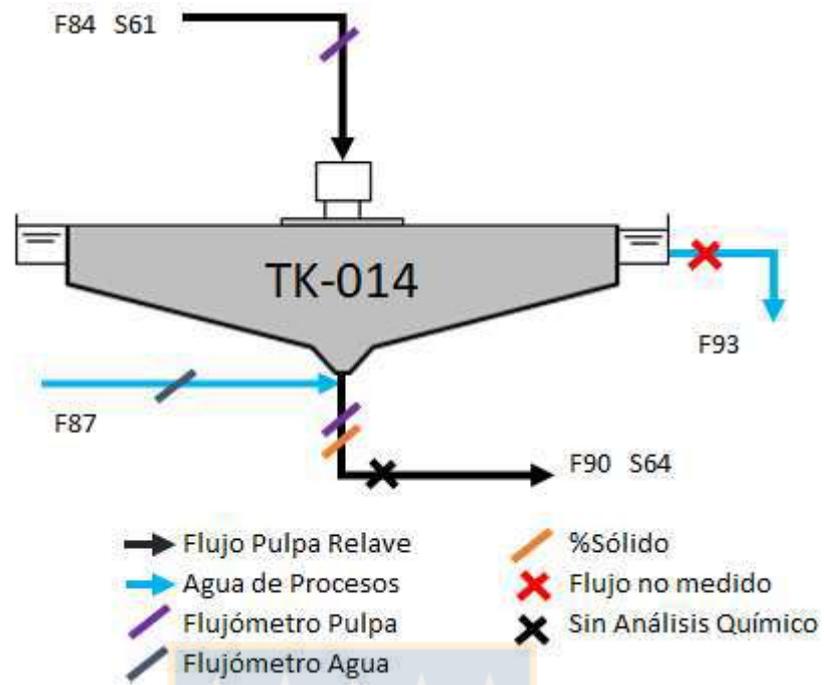


Figura 75: Diagrama Subsistema TK-014, Línea 2

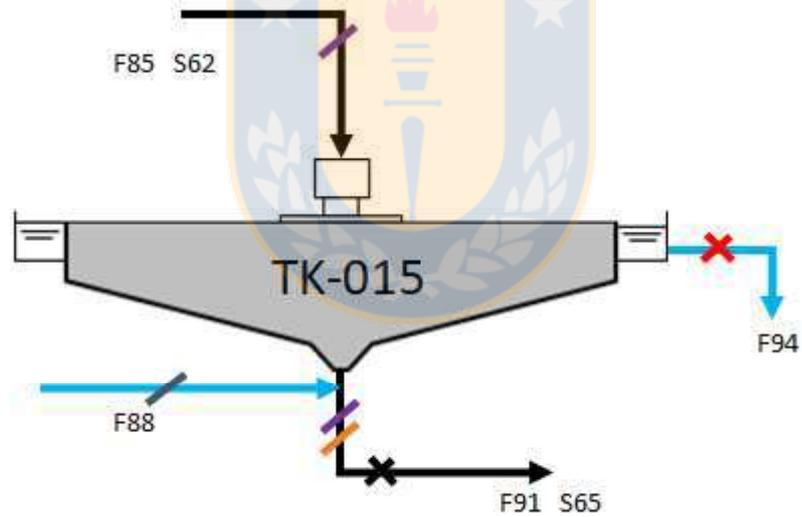


Figura 76: Diagrama Subsistema TK-015, Línea 2

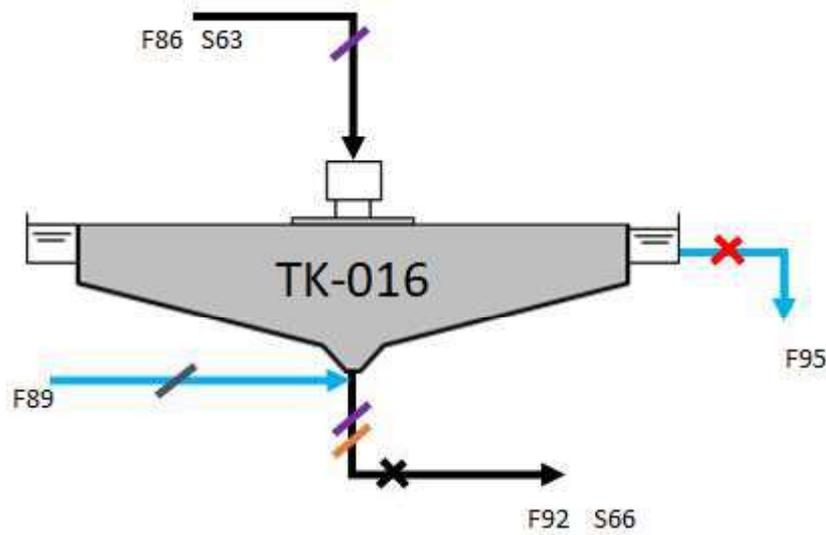


Figura 77: Diagrama Subsistema TK-016, Línea 2

7.5.7. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 2

$$S59 - S61 - S62 - S63 = 0 \quad (102)$$

$$S61 - S64 - S71 \quad (103)$$

$$S62 - S65 - S72 = 0 \quad (104)$$

$$S63 - S66 - S73 = 0 \quad (105)$$

7.5.8. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE RELAVES LÍNEA 2

$$F82 - F84 - F85 - F86 = 0 \quad (106)$$

$$F84 + F87 - F90 - F93 - F102 = 0 \quad (107)$$

$$F85 + F88 - F91 - F94 - F103 = 0 \quad (108)$$

$$F86 + F89 - F92 - F95 - F104 = 0 \quad (109)$$

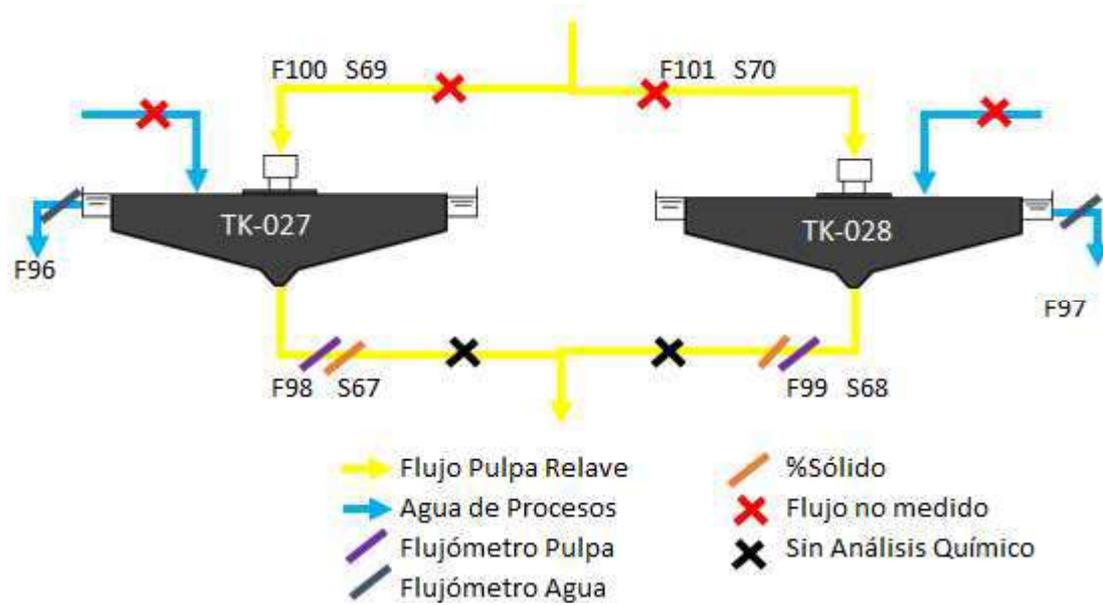


Figura 78: Diagrama subsistema espesadores de concentrado, Línea 2

7.5.9. ECUACIONES DE BALANCE DE SÓLIDOS ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 2

$$S58 - S69 - S70 = 0 \quad (110)$$

$$S69 - S67 - S74 = 0 \quad (111)$$

$$S70 - S68 - Y75 = 0 \quad (112)$$

7.5.10. ECUACIONES DE BALANCE DE AGUA ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO LÍNEA 2

$$F81 - F100 - F101 = 0 \quad (113)$$

$$F100 - F96 - F98 - F105 = 0 \quad (114)$$

$$F101 - F97 - F99 - F106 = 0 \quad (115)$$

Tabla 10: Definición de variables para balance de masa en Laguna Seca Línea 2.

t/h		m ³ /h		m ³ /h	
S30	Mineral fresco	F44	Agua SAG 5	F90	Descarga TK-014
S31	Pebble generado	F45	Agua Trommel	F91	Descarga TK-015
S32	Pebble recirculado	F46	Agua Harnero	F92	Descarga TK-016
S33	Pebble a piso	F47	Agua en SU-002	F93	Agua canaleta TK-014
S34	Sólido en SU-02	F48	Bajotamaño Trommel	F94	Agua canaleta TK-015
S35	Sólido Bajotamaño Trommel	F49	Sobretamaño Trommel	F95	Agua canaleta TK-016
S36	Sólido Sobretamaño Trommel	F50	Bajotamaño Harnero	F96	Agua clara TK-027
S37	Sólido Bajotamaño harnero	F51	Agua SU-105	F97	Agua clara TK-028
S38	Pulpa a CS-012	F52	Pulpa CS-012	F98	Descarga TK-027
S39	Pulpa a CS-013	F53	Agua underflow CS-012	F99	Descarga TK-028
S40	Pulpa a CS-014	F54	Agua SU-106	F100	Agua concentrado a TK-027
S41	Pulpa a CS-015	F55	Pulpa CS-013	F101	Agua concentrado a TK-028
S42	Pulpa overflow CS-012	F56	Agua underflow CS-013	F102	Inventario TK-014
S43	Pulpa underflow CS-012	F57	Agua SU-107	F103	Inventario TK-015
S44	Descarga MB-005	F58	Pulpa CS-014	F104	Inventario TK-016
S45	Pulpa overflow CS-013	F59	Agua underflow CS-014	F105	Inventario TK-027
S46	Pulpa underflow CS-013	F60	Agua SU-108	F106	Inventario TK-028
S47	Descarga MB-006	F61	Pulpa CS-015		
S48	Pulpa overflow CS-014	F62	Agua underflow CS-015		
S49	Pulpa underflow CS-014	F63	Pulpa overflow CS-012		
S50	Descarga MB-007	F64	Pulpa unerflow CS-012		
S51	Pulpa overflow CS-015	F65	Descarga MB-005		
S52	Pulpa underflow CS-015	F66	Pulpa overflow CS-013		
S53	Descarga MB-008	F67	Pulpa unerflow CS-013		
S54	Pulpa a Flotación	F68	Descarga MB-006		
S55	Alimentación Rougher	F69	Pulpa overflow CS-014		
S56	Concentrado Rougher	F70	Pulpa unerflow CS-014		
S57	Colas Rougher	F71	Descarga MB-007		
S58	Concentrado final	F72	Pulpa overflow CS-015		
S59	Colas finales	F73	Pulpa unerflow CS-015		
S60	Colas Scavenger	F74	Descarga MB-008		
S61	Relave a TK-014	F75	Agua en Pulpa a Flotación		
S62	Relave a TK-015	F76	Agua lavado Limp. Rougher		
S63	Relave a TK-016	F77	Agua lavado Limp. Scavenger		
S64	Descarga TK-014	F78	Agua en alimentación Rougher		
S65	Descarga TK-015	F79	Agua Concentrado Rougher		
S66	Descarga TK-016	F80	Agua colas Rougher		
S67	Descarga TK-027	F81	Agua Concentrado finales		
S68	Descarga TK-028	F82	Agua Colas finales		
S69	Concentrado a TK-027	F83	Agua colas Scavenger		
S70	Concentrado a TK-028	F84	Agua en Relave a TK-014		
S71	Inventario TK-014	F85	Agua en Relave a TK-015		
S72	Inventario TK-015	F86	Agua en Relave a TK-016		
S73	Inventario TK-016	F87	Agua dilución TK-014		
S74	Inventario TK-027	F88	Agua dilución TK-015		
S75	Inventario TK-028	F89	Agua dilución TK-016		

7.6. BALANCE LÍNEA 1

0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	1,00	0,00	1,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	1,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00
1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 79: Matriz A1 multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.

240,15	0,00	0,00	0,00	240,15	162,77	77,39	77,39	240,15	6,79	233,37	6,30	239,66	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	10,88	0,00	10,88	-10,88	-3,87	3,87	-7,01	-10,88	-0,31	-10,57	-0,29	-10,86	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	7,43	-7,43	7,43	5,04	2,40	2,39	7,43	0,21	7,22	0,19	7,41	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	10,88	-7,43	18,31	-18,31	-8,90	1,47	-9,40	-18,31	-0,52	-17,79	-0,48	-18,27	-0,04	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
240,15	-10,88	7,43	-18,31	258,46	171,67	75,91	86,79	258,46	7,31	251,16	6,78	257,93	0,53	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
162,77	-3,87	5,04	-8,90	171,67	80.071.952,98	-80.071.785,18	-80.071.781,31	171,67	4,85	166,82	4,50	171,32	0,35	-0,68	-0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
77,39	3,87	2,40	1,47	75,91	-80.071.785,18	80.071.864,96	80.071.861,09	75,91	2,15	73,77	1,99	75,76	0,16	-0,32	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
77,39	-7,01	2,39	-9,40	86,79	-80.071.781,31	80.071.861,09	80.071.868,10	86,79	2,45	84,34	2,28	86,62	0,18	-0,32	-0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
240,15	-10,88	7,43	-18,31	258,46	171,67	75,91	86,79	258,46	7,31	251,16	6,78	257,93	0,53	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,79	-0,31	0,21	-0,52	7,31	4,85	2,15	2,45	7,31	121.522.176,55	-121.522.169,25	118.424.196,76	-3.097.972,48	3.097.979,79	-0,03	-0,03	-0,03	0,00	-0,03	-0,35	-0,32	0,32	0,32	0,32
233,37	-10,57	7,22	-17,79	251,16	166,82	73,77	84,34	251,16	-121.522.169,25	121.522.420,40	-118.424.189,98	3.098.230,42	-3.097.979,26	-0,97	-0,97	0,00	-0,97	0,00	-0,97	-0,65	0,32	-0,32	-0,32
6,30	-0,29	0,19	-0,48	6,78	4,50	1,99	2,28	6,78	118.424.196,76	-118.424.189,98	124.892.416,38	6.468.226,39	-6.468.219,62	-0,03	-0,03	-0,03	0,00	-0,03	0,64	0,66	0,66	0,66	0,66
239,66	-10,86	7,41	-18,27	257,93	171,32	75,76	86,62	257,93	-3.097.972,48	3.098.230,42	6.468.226,39	9.566.456,81	-9.566.198,88	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	-1,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,98	
0,49	-0,02	0,02	-0,04	0,53	0,35	0,16	0,18	0,53	3.097.979,79	-3.097.979,26	-6.468.219,62	-9.566.198,88	9.566.199,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,02	
0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,68	-0,32	-0,32	-1,00	-0,03	-0,97	-0,03	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,36	0,36	-0,64	-1,00	-0,03	-0,97	-0,03	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,03	-0,97	-0,03	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,03	-0,97	-0,03	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,35	-0,65	0,64	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,32	0,32	0,66	-0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	-0,32	-0,66	-0,98	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura 80: Matriz A1⁻¹ multiplicadores de Lagrange para ajuste de sólidos Línea 1.

COMPOSITO TURNO DIA													
Muestra	DESCRIPCION	Cu (t) %	Cu (sol) %	Fe %	As %	Insol. %	# + 100 %	# - 325 %	sólido %	Recup. %	Zn %	pH	
1	Concentrado Final	27.63		25.2	0.13	6.1		75.4	31.8	86.3	1.15	11.03	
2	Alimentación Rougher	0.99	0.06	2.31			13.6		26.4				11.17
3	Cola Final	0.14	0.04	1.69					23.4				11.21
4	Cola Rougher	0.13	0.03	1.34					28.8				
5	Cola Scavenger	0.28	0.10	3.86					15.4				
6	Alimentación 1a Limpieza	6.34							19.0				
7	Concentrado Rougher	8.18							24.1				
8	Alimentación 2a Limpieza	17.62							28.3				

COMPOSITO TURNO NOCHE													
Muestra	DESCRIPCION	Cu (t) %	Cu (sol) %	Fe %	As %	Insol. %	# + 100 %	# - 325 %	sólido %	Recup. %	Zn %	pH	
1	Concentrado Final	27.42		24.2	0.13	7.0		78.5	38.6	87.3	0.85	10.95	
2	Alimentación Rougher	1.14	0.05	2.46			18.5		25.9				10.45
3	Cola Final	0.15	0.04	1.54					24.2				11.00
4	Cola Rougher	0.14	0.03	1.27					29.4				
5	Cola Scavenger	0.26	0.09	4.48					11.2				
6	Alimentación 1a Limpieza	9.78							25.0				
7	Concentrado Rougher	9.71							23.9				
8	Alimentación 2a Limpieza	17.63							16.4				

Figura 87: Ejemplo resultados compósitos Línea 1.

```

Function dens_molienda(cp As Double)
rho_pulp = ((0.997 * 2.79) / (2.79 * (1 - cp / 100) + 0.997 * cp / 100))
dens_molienda = rho_pulp
End Function

Function dens_concentrado(cpconc As Double)
rho_conc = ((0.997 * 4.25) / (4.25 * (1 - cpconc / 100) + 0.997 * cpconc / 100))
dens_concentrado = rho_conc
End Function

Function dens_relaves(cpcola As Double)
rho_colas = ((0.997 * 2.75) / (2.75 * (1 - cpcola / 100) + 0.997 * cpcola / 100))
dens_relaves = rho_colas
End Function

```

Figura 88: Funciones en VBA para cálculo de densidad de pulpa.

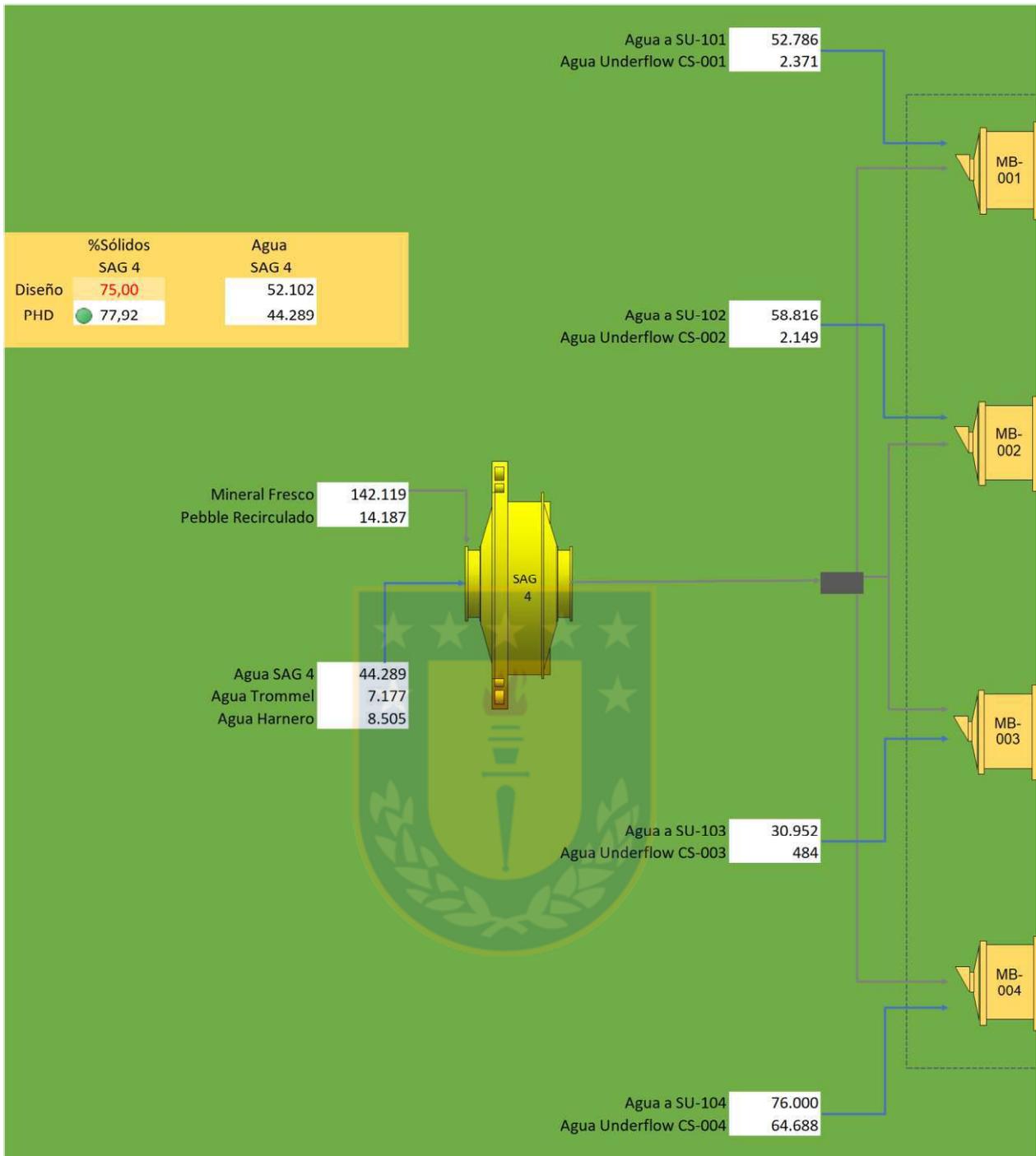


Figura 89: Interface de balance interactivo Línea 1, SAG 4-Molienda Bolas.

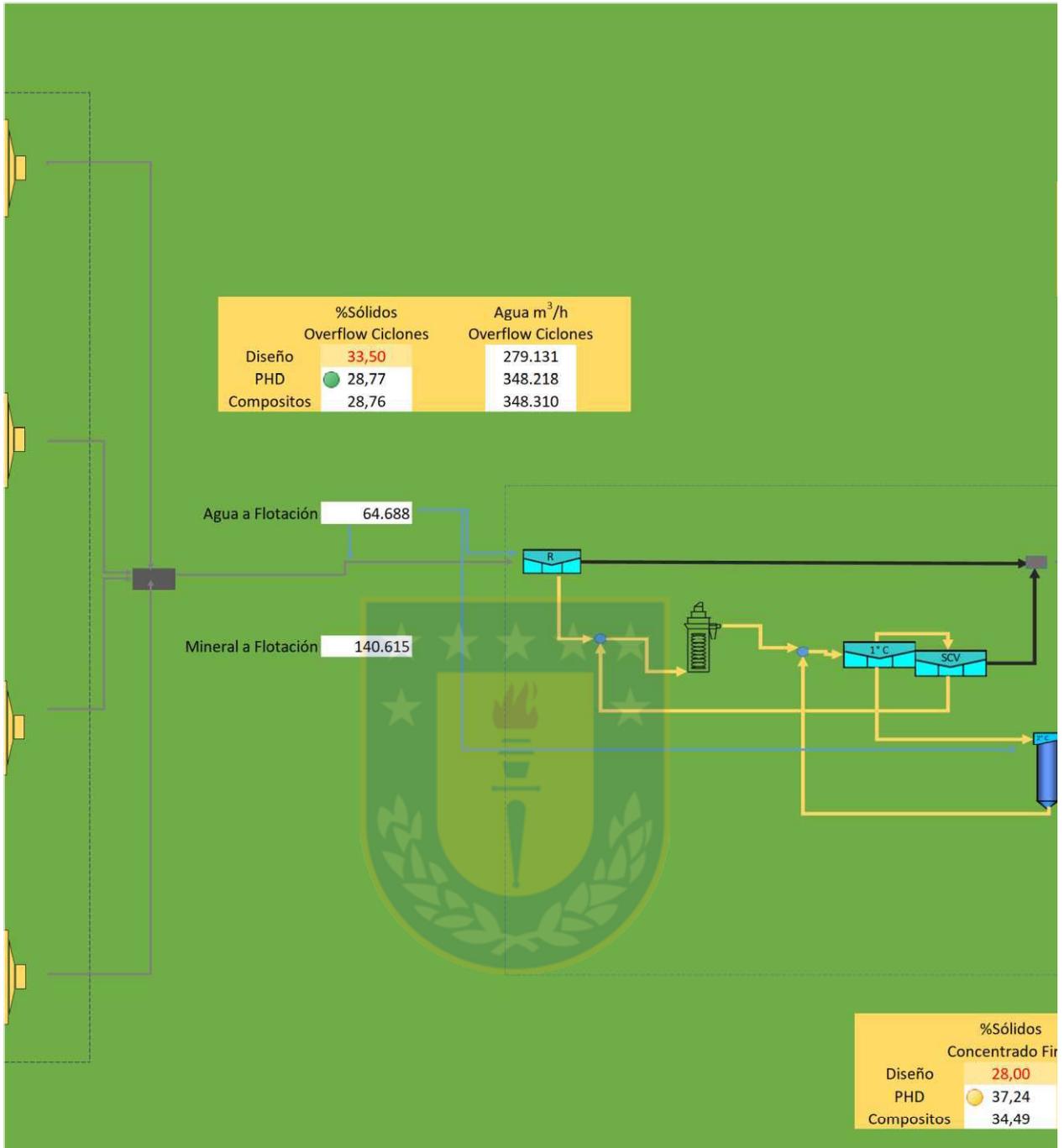


Figura 90: Interface de balance interactivo Línea 1, Molienda Bolas-Flotación.

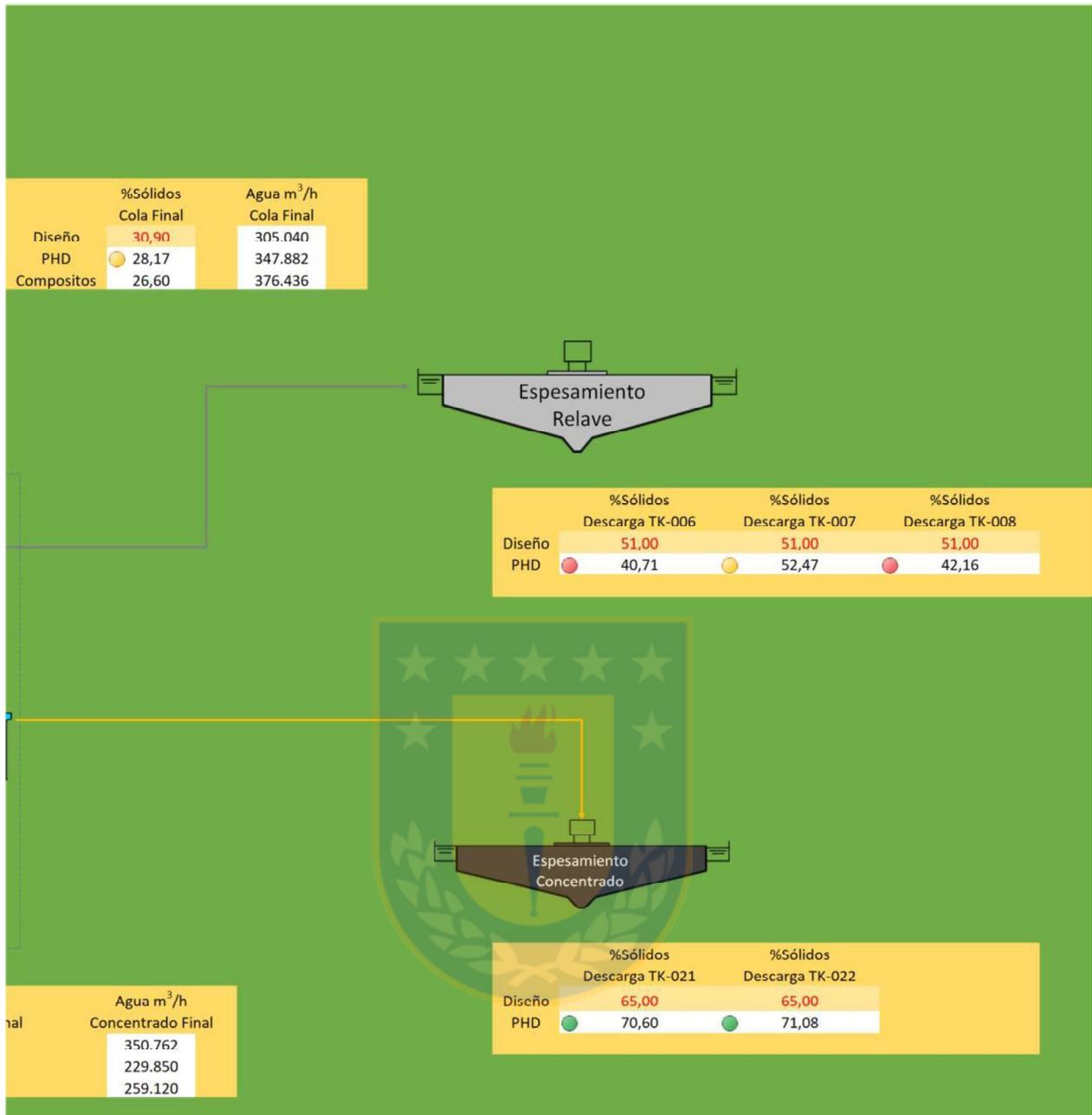


Figura 91: Interface de balance interactivo Línea 1, Flotación-Espesamiento.

Figura 94: Matriz A multiplicadores de Lagrange para ajuste de agua Línea 2.

COMPÓSITO TURNO DIA												
Muestra	DESCRIPCION	Cu (t) %	Cu (sol) %	Fe %	As %	Insol. %	# + 100 %	# - 325 %	sólido %	pH	Recup. %	Zn %
1	Alim. Rougher	0.80	0.04	2.05			22.4		29.62	11.01	80.5	
2	Cola Final	0.16	0.03	1.68			21.6		20.21	11.20		
3	Cola Rougher Global	0.13	0.02	1.31			20.3					
4	Cola Scavenger	0.47	0.10	4.42				80.4				
5	Concentrado Rougher	6.00		8.45				82.1				
6	Concentrado Scavenger	8.45		13.1								
7	Cola Columna Rougher	5.06		7.50								
8	Cola Columna Scavenger	6.50		11.4								
9	Concentrado Columna Rougher	29.80		25.6		4.9		71.7	29.13	10.89		
10	Concentrado Columna Scavenger	22.89		24.1		16		70.7	21.33	10.94		
11	Concentrado Final	27.43		23.7	0.18	9.8		71.0	26.88	11.08		3.48

COMPÓSITO TURNO NOCHE												
Muestra	DESCRIPCION	Cu (t) %	Cu (sol) %	Fe %	As %	Insol. %	# + 100 %	# - 325 %	sólido %	pH	Recup. %	Zn %
1	Alim. Rougher	0.77	0.04	2.31			22.1		28.39	10.41	83.6	
2	Cola Final	0.13	0.03	1.60			23.7		20.66	11.10		
3	Cola Rougher Global	0.11	0.02	1.19			24.3					
4	Cola Scavenger	0.44	0.12	5.10				81.7				
5	Concentrado Rougher	6.51		10.7				76.9				
6	Concentrado Scavenger	5.96		14.0								
7	Cola Columna Rougher	3.37		8.45								
8	Cola Columna Scavenger	5.15		13.8								
9	Concentrado Columna Rougher	29.21		24.9		5.0		66.9	24.59	11.00		
10	Concentrado Columna Scavenger	23.45		24.2		12		70.2	16.34	10.99		
11	Concentrado Final	25.79		24.7	0.16	9.2		66.9	31.53	10.97		1.48

Figura 96: Ejemplo compósitos Línea 2.

```
Function dens_conc(cpdesc As Double)
rho_conc = ((0.997 * 4.25) / (4.25 * (1 - cpdesc / 100) + 0.997 * cpdesc / 100))
dens_conc = rho_conc
End Function
```

```
Function dens_relaves(cprelave As Double)
rho_relaves = ((0.997 * 2.75) / (2.75 * (1 - cprelave / 100) + 0.997 * cprelave / 100))
dens_relaves = rho_relaves
End Function
```

```
Function dens_molienda(cp As Double)
rho_pulp = ((0.997 * 2.79) / (2.79 * (1 - cp / 100) + 0.997 * cp / 100))
dens_molienda = rho_pulp
End Function
```

Figura 97: Funciones de cálculo de densidad en VBA.

```
Sub Copiardata()  
' Copiardata Macro  
  Sheets("Balance ").Select  
  Range("C5:G15").Select  
  Selection.Copy  
  Sheets("Resumen Data").Select  
  Range("D6").Select  
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
    :=False, Transpose:=False  
  Sheets("Balance ").Select  
  Range("L5:P34").Select  
  Application.CutCopyMode = False  
  Selection.Copy  
  Sheets("Resumen Data").Select  
  Range("D17").Select  
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
    :=False, Transpose:=False  
  ActiveWindow.ScrollRow = 4  
  ActiveWindow.ScrollRow = 8  
  ActiveWindow.ScrollRow = 11  
  ActiveWindow.ScrollRow = 18  
  ActiveWindow.ScrollRow = 22  
  ActiveWindow.ScrollRow = 25  
  ActiveWindow.ScrollRow = 29  
  ActiveWindow.ScrollRow = 33  
  ActiveWindow.ScrollRow = 36  
  ActiveWindow.ScrollRow = 40  
  ActiveWindow.ScrollRow = 36  
  ActiveWindow.ScrollRow = 37  
  Sheets("Balance ").Select  
  Range("U5:Y12").Select  
  Application.CutCopyMode = False  
  Selection.Copy  
  Sheets("Resumen Data").Select  
  Range("D47").Select  
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
    :=False, Transpose:=False
```



```
Sheets("Balance ").Select
ActiveWindow.ScrollColumn = 2
ActiveWindow.ScrollColumn = 3
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
ActiveWindow.ScrollColumn = 5
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
ActiveWindow.ScrollColumn = 7
Range("AC44").Select
ActiveWindow.ScrollColumn = 8
ActiveWindow.ScrollColumn = 9
ActiveWindow.ScrollColumn = 10
ActiveWindow.ScrollColumn = 11
ActiveWindow.ScrollColumn = 12
ActiveWindow.ScrollColumn = 13
ActiveWindow.ScrollColumn = 14
ActiveWindow.ScrollColumn = 15
Range("AD5:AH19").Select
Range("AH19").Activate
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Resumen Data").Select
Range("D55").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks_
:=False, Transpose:=False
ActiveWindow.ScrollRow = 36
ActiveWindow.ScrollRow = 40
ActiveWindow.ScrollRow = 43
ActiveWindow.ScrollRow = 47
ActiveWindow.ScrollRow = 50
ActiveWindow.ScrollRow = 54
ActiveWindow.ScrollRow = 57
ActiveWindow.ScrollRow = 61
ActiveWindow.ScrollRow = 62
Sheets("Balance ").Select
ActiveWindow.ScrollColumn = 14
ActiveWindow.ScrollColumn = 15
ActiveWindow.ScrollColumn = 16
```



```
ActiveWindow.ScrollColumn = 17
ActiveWindow.ScrollColumn = 18
ActiveWindow.ScrollColumn = 19
ActiveWindow.ScrollColumn = 20
Range("A5:A12").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Resumen Data").Select
Range("D70").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Sheets("Balance ").Select
ActiveWindow.ScrollColumn = 19
ActiveWindow.ScrollColumn = 18
ActiveWindow.ScrollColumn = 17
ActiveWindow.ScrollColumn = 16
ActiveWindow.ScrollColumn = 15
ActiveWindow.ScrollColumn = 14
ActiveWindow.ScrollColumn = 15
ActiveWindow.ScrollRow = 2
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 7
ActiveWindow.ScrollRow = 8
Range("U36:W45").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Sheets("Resumen Data").Select
ActiveWindow.ScrollColumn = 2
ActiveWindow.ScrollColumn = 3
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
ActiveWindow.ScrollColumn = 9
ActiveWindow.ScrollColumn = 10
ActiveWindow.ScrollColumn = 13
```



```

ActiveWindow.ScrollColumn = 14
ActiveWindow.ScrollColumn = 15
ActiveWindow.ScrollColumn = 16
ActiveWindow.ScrollColumn = 17
ActiveWindow.ScrollColumn = 18
ActiveWindow.ScrollColumn = 19
ActiveWindow.ScrollColumn = 21
ActiveWindow.ScrollColumn = 22
ActiveWindow.ScrollColumn = 24
ActiveWindow.ScrollColumn = 25
ActiveWindow.ScrollColumn = 26
ActiveWindow.ScrollColumn = 25
ActiveWindow.ScrollColumn = 24
ActiveWindow.ScrollColumn = 23
ActiveWindow.ScrollColumn = 24
ActiveWindow.ScrollRow = 61
ActiveWindow.ScrollRow = 57
ActiveWindow.ScrollRow = 54
ActiveWindow.ScrollRow = 50
ActiveWindow.ScrollRow = 43
ActiveWindow.ScrollRow = 40
ActiveWindow.ScrollRow = 36
ActiveWindow.ScrollRow = 29
ActiveWindow.ScrollRow = 25
ActiveWindow.ScrollRow = 26
ActiveWindow.ScrollRow = 25
ActiveWindow.ScrollRow = 22
ActiveWindow.ScrollRow = 18
ActiveWindow.ScrollRow = 15
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 8
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Range("AG7").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
End Sub

Function sobrenadante(nivelcanal As Double)
AC = 3.14159265 * (24.96) * (nivelcanal / 100)
'Volumen de la canaleta por diseno maximo de 78.33 m3/h de overflow
'altura canaletas=1m
'por calculo de diseno ancho de canaletas=0.2m
'62.5^2-62.3^2=24.96
sobrenadante = AC
End Function

```

Figura 98: Función para cálculo de agua recuperada espesadores de relave.

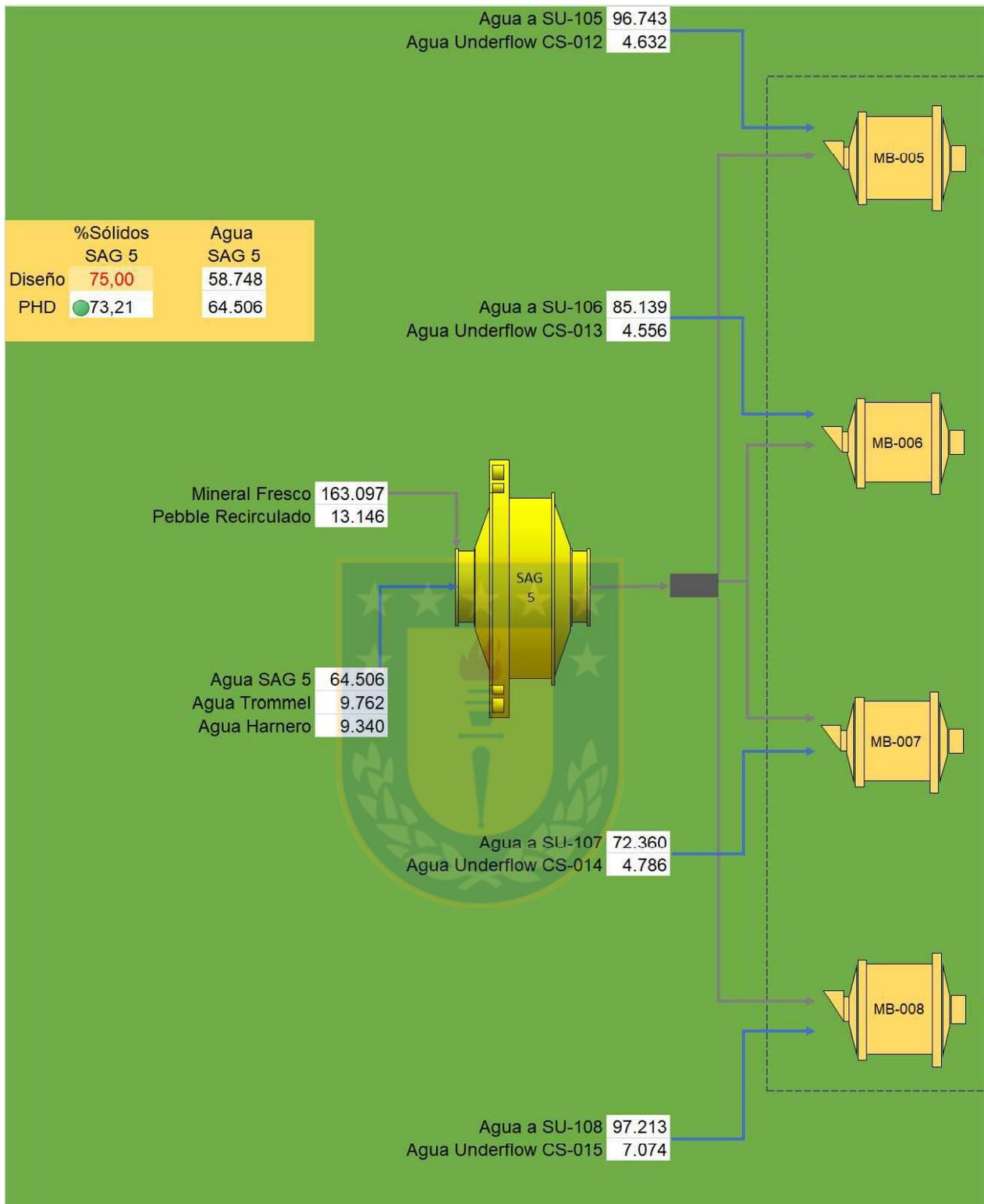


Figura 99: Interface de balance interactivo Línea 2, SAG 5-Molienda Bolas.

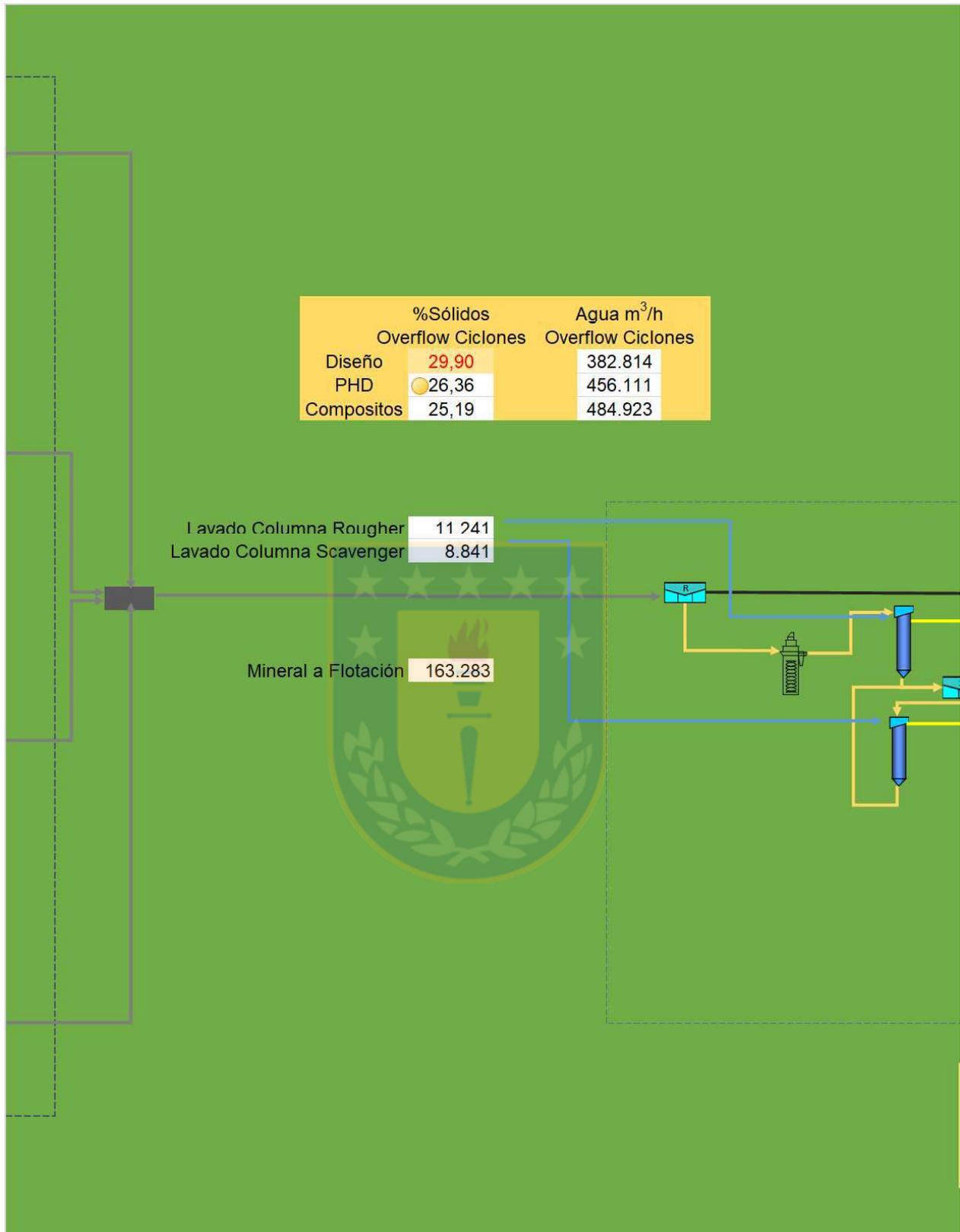


Figura 100: Interface de balance interactivo Línea 2, Molienda Bolas-Flotación.

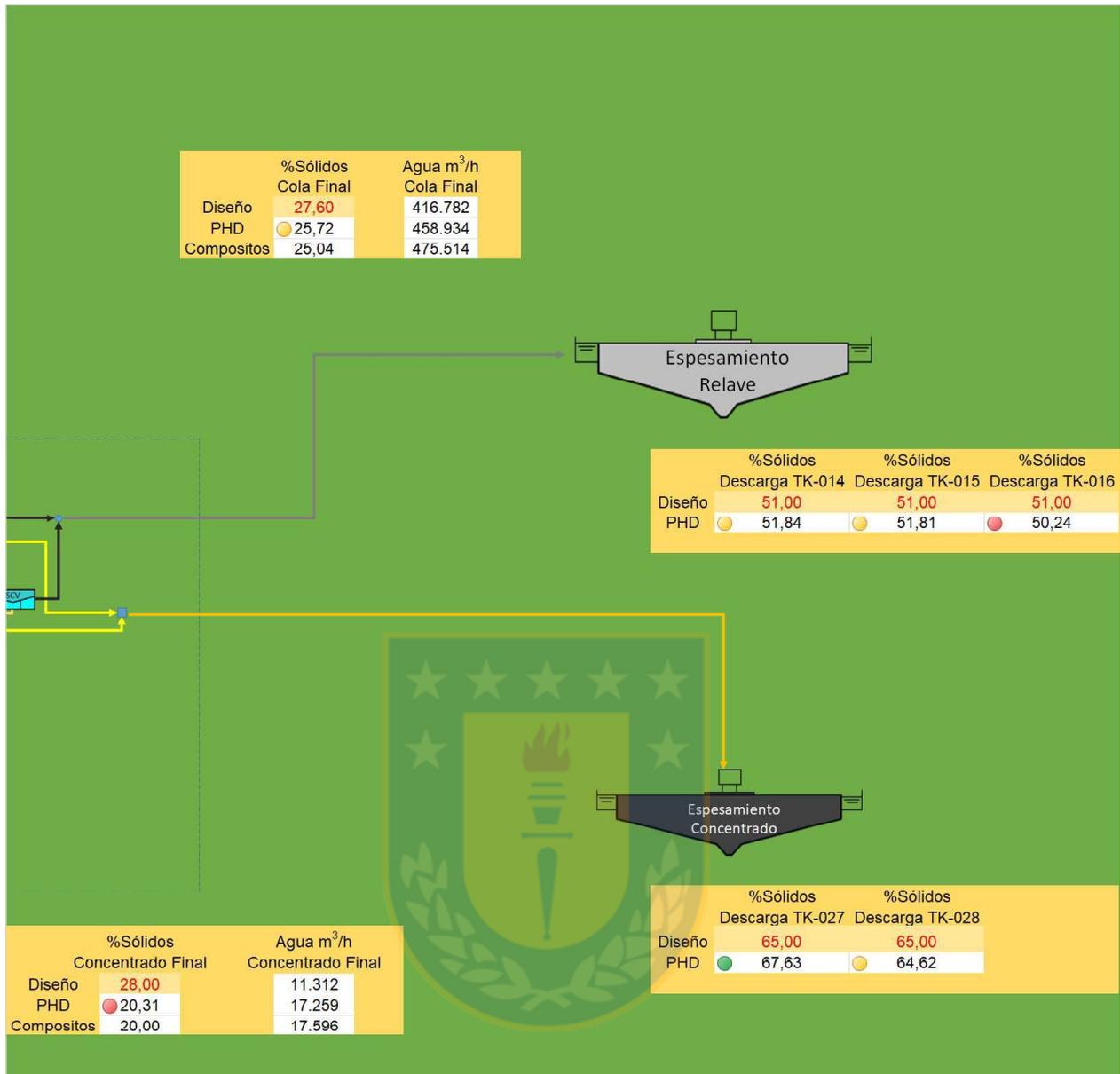


Figura 101: Interface de balance interactivo Línea 2, Flotación-Espesamiento.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Balance de agua y ajuste con multiplicadores de Lagrange. Concentradora Laguna Seca, Minera Escondida.
Nombre Memorista: Emilio José Venegas Venegas

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Prof. Fernando Elías Betancourt Cerda
		Ingeniero Supervisor: Rodrigo Aravena Aravena
		Institución: Minera Escondida Limitada

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Leopoldo Gutiérrez Briones	Prof. Froilán Vergara Gutiérrez
----------------------------------	---------------------------------

Resumen

El objetivo de esta memoria de título es realizar el balance de agua para las plantas concentradoras Laguna Seca Línea 1 y Línea 2 de Minera Escondida y ajustarlo aplicando multiplicadores de Lagrange, para lo cual fue necesario ejecutar el levantamiento del estado de instrumentación y de datos de ambas plantas, estimar el error de medición de flujos, actualizar las mallas de balance, cálculo y reconciliación del balance de sólidos, cobre fino y agua.

Para el caso de la Línea 1, la reconciliación del balance muestra una adición no cuantificada de agua de 1.836.244 m³ durante el muestreo, lo que equivale a una diferencia del 17,44% sobre el total y a 0,43 $\frac{m^3}{t}$. Mientras que las colas finales reportaron una disminución de 1.107.745 m³, equivalente a un 9,58% sobre el total. La reconciliación de la Línea 2 evidencia una disminución en el ingreso de agua de 120.554 m³, representando una diferencia del 0,90% y 0,025 $\frac{m^3}{t}$, mientras que para las colas finales se registra una disminución de 455.391 m³ durante el estudio, equivalente a un ajuste del 3,38% sobre el total mensual.

La tasa de consumo ponderada para la Línea 1 es de 1,00 $\frac{m^3}{t}$, representando un sobreconsumo de 447,331 m³ sobre el reporte, en cambio para la Línea 2, la tasa de consumo ponderada es 0,90 $\frac{m^3}{t}$, significando un sobrecargo de 157,764 m³.

Se concluye que la mayor pérdida en la eficiencia en el consumo de agua para ambas líneas se debe a la inadecuado control en la adición de agua de procesos al sistema, mientras que las pérdidas de eficiencia en la recuperación de agua se deben a porcentajes de sólidos del orden de 49% y 50% en la descarga de los espesadores de relaves de la Línea 1 y Línea 2 respectivamente.